



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ  
MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO 3D TISK**

DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS USED FOR 3D  
PRINTING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Martin Černý

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2019

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Martin Černý**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Stanovení mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Diplomová práce se bude zabývat stanovením mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk. Materiály budou analyzovány pomocí mechanických zkoušek. Normalizované vzorky budou zhotoveny aditivní metodou Fused Deposition Modeling s využitím 3D tiskárny. Práce bude ukončena zhodnocením dosažených výsledků, které budou porovnávány s hodnotami udávány stanovenými normami.

#### **Cíle diplomové práce:**

- Teoretická část – rozbor materiálů a mechanických zkoušek.
- Charakteristika a rozbor aplikované technologie 3D tisku.
- Experimentální část – provedení mechanických zkoušek.

#### **Seznam doporučené literatury:**

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-2-4-4025-8.

CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

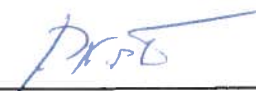

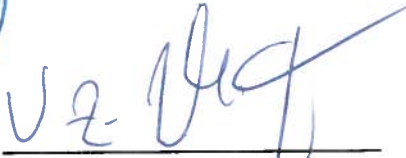
JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004. pp. 112. ISBN 186-058-465-9.

PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.

SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09. 2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018

		
_____ prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu		_____ doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zejména stanovením mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk (ABS, nylon a PLA). Normalizované vzorky, vyrobené pomocí 3D tiskárny s využitím aditivní metody Fused Deposition Modeling, byly následně použity pro mechanické zkoušky. Práce je rozšířena také o stanovení mechanických vlastností vzorků, zhotovených technologií Soft Tooling. Pro výrobu vzorků technologií Soft Tooling byly použity polyuretanové pryskyřice SG 2000 a SG 145. Jednotlivé materiály byly analyzovány pomocí mechanických zkoušek (zkouška tahem a zkouška tvrdosti). U materiálů zhotovených technologií 3D tisku byly rovněž stanoveny parametry integrity povrchu. Z jednotlivých zkoušek byly vybrány parametry (mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, tažnost a tvrdost), které byly následně statisticky zpracovávány. Práce je ukončena zhodnocením dosažených výsledků, které byly porovnávány s hodnotami udávanými v materiálových listech.

## Klíčová slova

Mechanické vlastnosti, 3D tisk, zkušební vzorek, zkouška tahem, materiál.

## ABSTRACT

The thesis deals with the determination of mechanical properties of materials used for 3D printing (ABS, nylon and PLA). Standardized samples produced using a 3D printer using the Fused Deposition Modeling method were subsequently used for mechanical testing. The work is also extended to determine the mechanical properties of samples made by Soft Tooling. For the production of Soft Tooling samples, polyurethane resins SG 2000 and SG 145 were used. Individual materials were analyzed by mechanical tests (tensile test and hardness test). Surface integrity parameters have also been determined for 3D-printed materials. Parameters were selected from the individual tests (tensile strength, modulus of elasticity) ductility and hardness), which were subsequently statistically processed. The work is concluded by evaluating the results obtained, which were compared with the values given in material sheets.

## Key words

Mechanical properties, 3D print, test sample, tensile test, materiál.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERNÝ, Martin. *Stanovení mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk*. Brno 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 145 s. 41 příloh. doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Stanovení mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Martin Černý

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále pak děkuji kpt. Ing. Zdeňkovi Joskovi, Ph.D. za spolupráci při zhotovení tahové zkoušky a také kpt. Ing. Davidu Dobrockému, Ph.D. za realizaci vyhodnocení textury povrchu. Rovněž děkuji doc. RNDr. Zdeňkovi Karpíškovi, CSc. za cenné rady při statistickém vyhodnocení naměřených dat. Taktéž bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při vypracování diplomové práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ .....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 Teoretická část – rozbor materiálů a mechanických zkoušek.....	9
1.1 Zkouška tahem.....	9
1.1.1 Smluvní tahový diagram.....	11
1.1.2 Hookův zákon.....	12
1.1.3 Mez kluzu .....	13
1.1.4 Mez pevnosti.....	13
1.1.5 Tažnost.....	15
1.1.6 Kontrakce.....	16
1.2 Zkoušky tvrdosti .....	16
1.2.1 Základní rozdělení zkoušek tvrdosti:.....	17
1.2.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella.....	17
1.2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	18
1.2.4 Zkouška tvrdosti podle Rockwella .....	20
1.2.5 Zkouška tvrdosti odrazem.....	21
1.3 Měření drsnosti povrchu .....	22
1.3.1 Metody měření drsnosti povrchu .....	22
1.3.2 Parametry profilu povrchu .....	23
1.4 Rozbor materiálů.....	25
1.4.1 Termoplasty .....	26
1.4.2 Reaktoplasty.....	29
1.4.3 Porovnání termoplastů vs. reaktoplastů.....	30
2 Charakteristika a rozbor aplikované technologie 3D tisku (technologie 3D tisku).....	32
2.1 Technologie 3D tisku na bázi tuhých materiálů .....	32
2.1.1 Technologie Laminated Object Manufacturing .....	32
2.1.2 Technologie Fused Deposition Modeling.....	33
2.1.3 Technologie Multi Jet Modeling.....	34
2.2 Technologie 3D tisku na bázi fotopolymerů.....	35
2.2.1 Technologie Stereo Litography Apparatus.....	35
2.2.2 Technologie Solid Ground Cutting.....	36

2.3	Technologie 3D tisku na bázi práškového materiálu.....	36
2.3.1	Technologie Selective Laser Sintering .....	37
2.3.2	Technologie Direct Metal Laser Sintering.....	38
2.4	Shrnutí popisovaných metod .....	39
3	Experimentální část – provedení mechanických zkoušek. ....	40
3.1	Zkouška tahem materiálů zhotovených technologií 3D tisku.....	40
3.1.1	Výběr typu zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku .....	40
3.1.2	Tvorba modelu zkušebního vzorku.....	41
3.1.3	Zhotovení zkušebních vzorků.....	42
3.1.4	Provedení tahové zkoušky .....	44
3.2	Zkouška tahem materiálů zhotovených metodou Soft Tooling.....	47
3.2.1	Výroba silikonové formy .....	47
3.2.2	Výroba zkušebních vzorků metodou Soft Tooling .....	50
3.2.3	Provedení tahové zkoušky .....	51
3.3	Zkouška tvrdosti .....	52
3.4	Stanovení drsnosti povrchu.....	53
4	Zhodnocení dosažených výsledků .....	54
4.1	Vyhodnocení výsledků u materiálu ABS.....	55
4.1.1	ABS horizontální tisk 2013.....	56
4.1.2	ABS vertikální tisk 2013.....	61
4.1.3	ABS horizontální tisk 2018.....	65
4.1.4	ABS vertikální tisk 2018.....	70
4.1.5	Porovnání horizontálního a vertikálního tisku u materiálu ABS .....	74
4.1.6	Porovnání materiálu ABS z roku 2013 vs. materiál ABS z roku 2018 .....	80
4.1.7	Vyhodnocení tvrdosti u materiálu ABS.....	87
4.1.8	Vyhodnocení drsnosti povrchu u materiálu ABS .....	88
4.2	Vyhodnocení ostatních zkoušených materiálů .....	91
5	Diskuse k dosaženým výsledkům .....	92
	ZÁVĚR .....	96
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	97
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	100
	SEZNAM PŘÍLOH.....	104



## ÚVOD

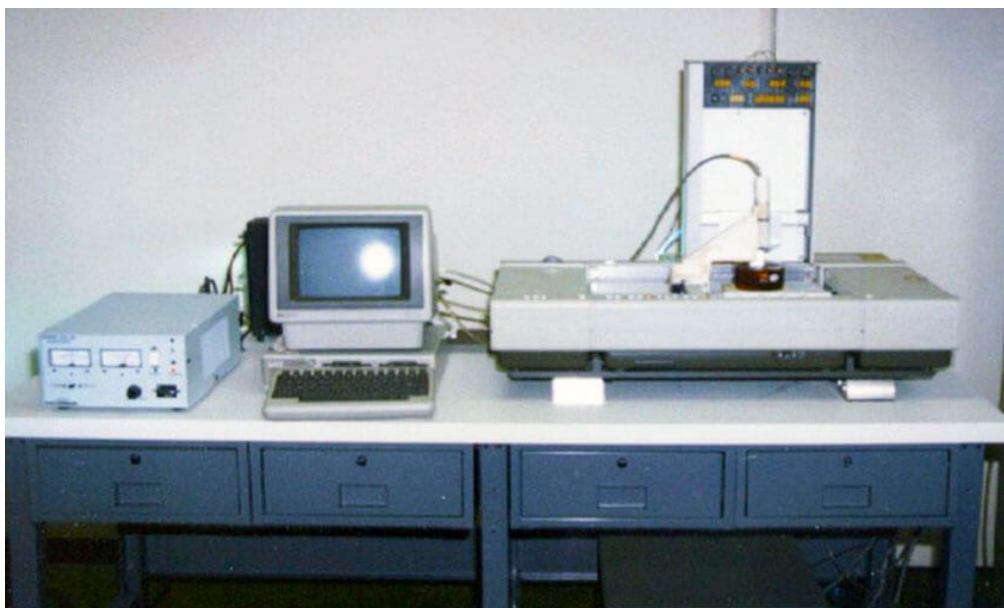
První pokusy s technologií 3D tisku jsou přisuzovány Dr. Kodamovi, který v roce 1980 popsal technologii výroby po jednotlivých vrstvách dnes známé jako Rapid Prototyping. První funkční 3D tiskárna (viz obr. 1.0), na principu SLA technologie, byla zhotovena až v roce 1987 Charlesem Hullem. Název této tiskárny byl SLA-1 (viz obr. 1.0). Další technologie 3D tisku byla vyvinuta na univerzitě v Texasu v roce 1988. Jednalo se o technologii SLS, kde byla jednotlivá zrnka prášku spojována laserem. V roce 1992 byl firmě Stratasys udělen patent na technologii FDM a v dnešní době patří mezi nejlepší výrobce 3D tiskáren [1, 2, 3].

Technologie 3D tisku se do povědomí široké veřejnosti dostala až začátkem 21. století, kdy byla vytisknuta první ledvina. První transplantace ledviny do lidského těla byla provedena až za 13 let. V roce 2004 vnikl projekt RepRap a 3D tiskárny se staly dostupnými i pro širokou veřejnost. Po vypršení patentu v roce 2009 firmy Stratasys došlo k velkému rozvoji 3D tiskáren a začalo vznikat mnoho nových firem zabývajících se 3D tiskem. Technologie 3D tisku se začala implementovat do výroby (např. v roce 2010 byl vytisknut první automobil). Další velký pokrok nastal v roce 2014, kdy byla technologie 3D tisku použita mimo naši planetu. Bylo tak učiněno na mezinárodní vesmírné stanici [1, 2, 3].

3D tisk se stále nachází ve stádiu výzkumu. Do velkého zájmu se dostal 3D tisk kovů, který se už v dnešní době používá například na výrobu součástek do automobilů.

Velkým vývojem také procházejí materiály používané v této technologii. Dochází ke vzniku nových typů materiálů, které se dále aplikují při výrobě.

Hlavním důvodem sepsání této práce je ověření vybraných vlastností materiálů za účelem následného používání v praxi. Mechanické vlastnosti hrají významnou roli pro následné používání.



Obr. 1.0 První zhotovená 3D tiskárna [3].

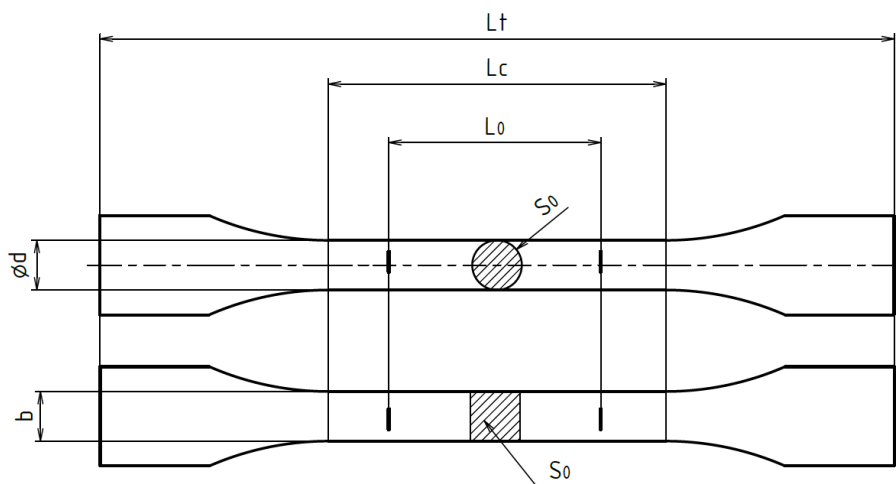
## 1 TEORETICKÁ ČÁST – ROZBOR MATERIÁLŮ A MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

Pro zjišťování mechanických vlastností různých typů materiálů se používají mechanické zkoušky. Vzorek o příslušném tvaru a rozměru se podrobí účinkům mechanických sil. Výsledkem zkoušek jsou mechanické vlastnosti, které charakterizují vlastnosti materiálu proti působení vnějších sil. Tyto síly mohou být jak dynamické, tak statické. Statické zatěžování je definováno tak, že velikost zatěžující síly je konstantní nebo pomalu dochází ke změně velikosti při zachování směru. Při dynamických zkouškách působí síly rázem nebo mění velikost a směr [4, 5].

### 1.1 Zkouška tahem

Statická zkouška tahem patří k nejpoužívanější zkoušce, která slouží k hodnocení mechanických vlastností konstrukčních materiálů. Princip této zkoušky spočívá v zatěžování zkušební vzorku pomalu zvyšující se tahovou silou až do okamžiku lomu. Vzorek je upnut v čelistích zkušebního zařízení tak, aby osa vzorku byla totožná s osou čelistí. Cílem zkoušky tahem je stanovení deformačních a napětových parametrů. Nejčastěji se zkouška provádí za pokojové teploty (23 °C), kterou předepisuje norma ČSN EN ISO 6892-1. Tahová zkouška se může provádět jak za zvýšených, tak snížených teplot vzorku [4, 5, 6].

Zkušební vzorky používané pro tahovou zkoušku se nazývají zkušební tyče. Zkušební tyče rozdělujeme dle průřezu na ploché a kruhové (viz obr. 1.1).

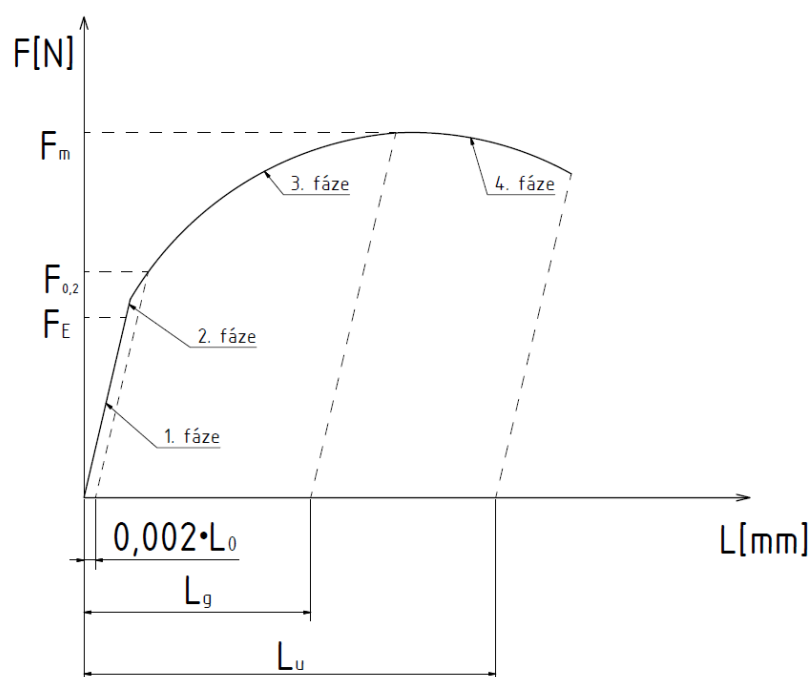


Obr. 1.1 Základní typy zkušebních tyčí:  $S_0$  – průřez zkušební tyče,  $L_c$  – zkušební délka tyče,  $L_t$  – celková délka tyče,  $L_0$  – výchozí délka,  $a$  – tloušťka tyče,  $b$  – šířka tyče,  $\varnothing d$  – průměr tyče [4].

Další dělení zkušebních tyčí je na krátké a dlouhé. Výchozí délka u krátké kruhové zkušební tyče  $L_0 = 5 \cdot d_0$  a pro ploché tyče je rovna  $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ . Dlouhé zkušební tyče jsou zadány dle vztahů: kruhová tyč  $L_0 = 10 \cdot d_0$ , plochá tyč  $L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$ . Upínací část u válcové tyče může být hladká nebo může být opatřena závitem, který se našroubuje do zkušebního zařízení [4, 5, 6].

V průběhu zatěžování dochází k zaznamenání zatěžující síly v závislosti na délce. Výsledkem naměřených hodnot je pracovní diagram (viz obr. 1.2). Během tahové zkoušky prochází hodnocený materiál čtyřmi fázemi [4, 5]:

- a) **1. fáze (oblast pružných deformací):** dochází k prodlužování zkušební tyče, které je přímo úměrné vzrůstající síle. V diagramu je tato oblast tvořena přímkou. Deformace zkušební tyče je v této oblasti elastická. Tyč se po odlehčení vrátí do původního stavu. Konec 1. fáze určuje síla na mezi úměrnosti  $F_E$  (viz obr. 1.2), běžně se tato síla neurčuje. U většiny neželezných kovů a litin s lupínkovým grafitem se 1. fáze nevyskytuje a diagram začíná 2. fází [4, 5].
- b) **2. fáze (oblast od meze úměrnosti do meze kluzu):** je ukončena silou, která se nazývá síla na mezi kluzu  $F_{0,2}$  (viz obr. 1.2). Po překročení této síly dochází ke vzniku trvalé deformace [4, 5].
- c) **3. fáze (oblast rovnoměrných trvalých deformací):** v této oblasti dochází k trvalé změně tvaru. Zkušební vzorek se rovnoměrně deformuje po celé své délce. V okamžiku, kdy dojde k poklesu zatěžující síly, začne tvorba krčku. Největší zatížení, které je během zkoušky naměřeno, se označuje  $F_m$  (viz obr. 1.2) [4, 5].
- d) **4. fáze (oblast nerovnoměrných trvalých deformací):** tato oblast se vyznačuje poklesem zatěžovací síly a vznikem krčku. Dochází k prodlužování pouze v oblasti krčku, zbytek zkušební tyče se dále neprodužuje. I přes zmenšující se sílu dochází k prodlužování krčku, je to způsobeno poklesem průřezu. Vlivem zmenšujícího se průřezu zkušební tělesa roste napětí v oblasti krčku. Konec 4. fáze je dosažen po přetržení zkušební tyče (viz obr. 1.2) [4, 5].



Obr. 1.2 Pracovní diagram [4, 5].

### 1.1.1 Smluvní tahový diagram

Pracovní diagram (viz obr. 1.2) neumožňuje porovnání mechanických parametrů jednotlivých materiálů a z tohoto důvodu se přepočítává na napětí  $\sigma$  [MPa] a relativní prodloužení  $\varepsilon$  [-] [4, 5].

Vlivem zatěžování dochází ke vzniku tahového napětí a poměrného prodloužení (viz vtahy 1.1, 1.2):

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (1.1)$$

$\sigma$  – tahové napětí [MPa],

F – zatěžující síla [N],

S – aktuální průřez vzorku [mm<sup>2</sup>],

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [-]} \quad (1.2)$$

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-],

$\Delta L$  – změna délky zkušební vzorku [mm],

$L_0$  – počáteční délka vzorku [mm] [4, 5, 6].

Toto napětí je označováno jako skutečné napětí (viz vztah 1.1). Zatěžující síla je vztahována na aktuální průřez vzorku. Protože měření aktuálního průřezu zkušební tyče je v praxi obtížné (převážně u nekruhových vzorků, kde dochází ke změně jak tloušťky, tak šířky a též ke změně tvaru průřezu), bylo z tohoto důvodu ustanoveno smluvní napětí. Smluvní napětí je označováno písmenem R [4, 5, 6]:

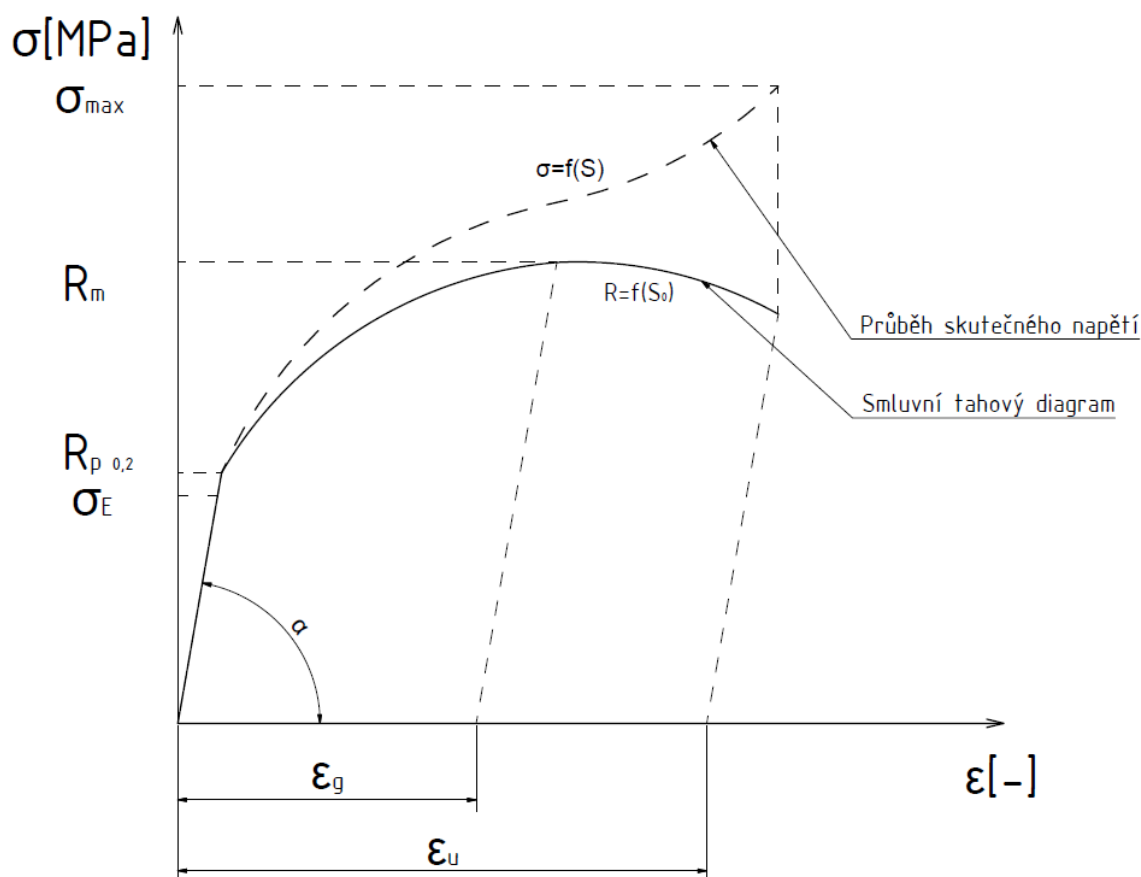
$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1.3)$$

R – smluvní napětí [MPa],

F – zatěžující síla [N],

S – počáteční průřez vzorku [mm<sup>2</sup>].

Smluvní tahový diagram (viz obr. 1.3) znázorňuje závislost smluvního napětí (viz vztah 1.3) na poměrném prodloužení (viz vztah 1.2). V oblasti do meze kluzu je hodnota tahového napětí  $\sigma$  [MPa] téměř shodná s hodnotou smluvního napětí R [MPa], je to způsobeno tím, že  $S_0 \cong S$ . Rozdíl mezi hodnotami tahového napětí  $\sigma$  [MPa] a smluvního napětí R [MPa] se zvyšuje od meze kluzu (viz obr. 1.3). Největší rozdíl mezi těmito hodnotami je od meze pevnosti, kde tahové napětí stále roste, přičemž smluvní napětí klesá (viz obr. 1.3). Je to způsobeno poklesem průřezu vzorku [4, 6].



Obr. 1.3 Porovnání skutečného vs. smluvního tahového diagramu [4, 6].

### 1.1.2 Hookův zákon

Hookův zákon vyjadřuje vztah mezi napětím a relativním prodloužením (viz vztah 1.5). Hookův vztah je ve smluvním tahovém diagramu znázorněn jako přímka. Hodnota modulu pružnosti  $E$  je směrnici Hookovy přímky. Matematické vyjádření modulu pružnosti je (viz vztah 1.4) [4, 5, 6]:

$$E = \tan(\alpha) \quad (1.4)$$

$E$  – modul pružnosti v tahu [MPa],

$\alpha$  – úhel, který svírá Hookova přímka s vodorovnou osou (viz obr. 1.3) [°],

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (1.5)$$

$\sigma$  – tahové napětí [MPa],

$F$  – zatěžující síla [N],

$S$  – aktuální průřez vzorku [mm<sup>2</sup>],

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-],

$\Delta L$  – změna délky zkušební vzorku [mm],

$L_0$  – počáteční délka vzorku [mm],

$E$  – modul pružnosti v tahu [MPa].

### 1.1.3 Mez kluzu

Mez kluzu je hodnota smluvního napětí. Do této hodnoty platí Hookův zákon, materiál se deformuje elasticky (při odlehčení se materiál vrátí do původního stavu), po překročení meze kluzu dochází k trvalé deformaci. Mez kluzu je nejdůležitější pevnostní materiálovou charakteristikou, která charakterizuje odolnost proti plastické deformaci. Mez kluzu je hodnota, která se používá pro výpočet dovoleného namáhání. Dle chování materiálů se při tahové zkoušce používají dva druhy meze kluzu (viz vztahy 1.6, 1.7, 1.8, 1.9) [4, 5, 6]:

a) Výrazná mez kluzu se používá pro materiály s výraznou mezí kluzu (viz obr. 1.4):

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1.6)$$

Někdy se také používá horní a dolní mez kluzu (viz obr. 1.4):

Horní mez kluzu

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \text{ [MPa]}$$

(1.7)

Dolní mez kluzu

$$R_{eD} = \frac{F_{eD}}{S_0} \text{ [MPa]}$$

(1.8)

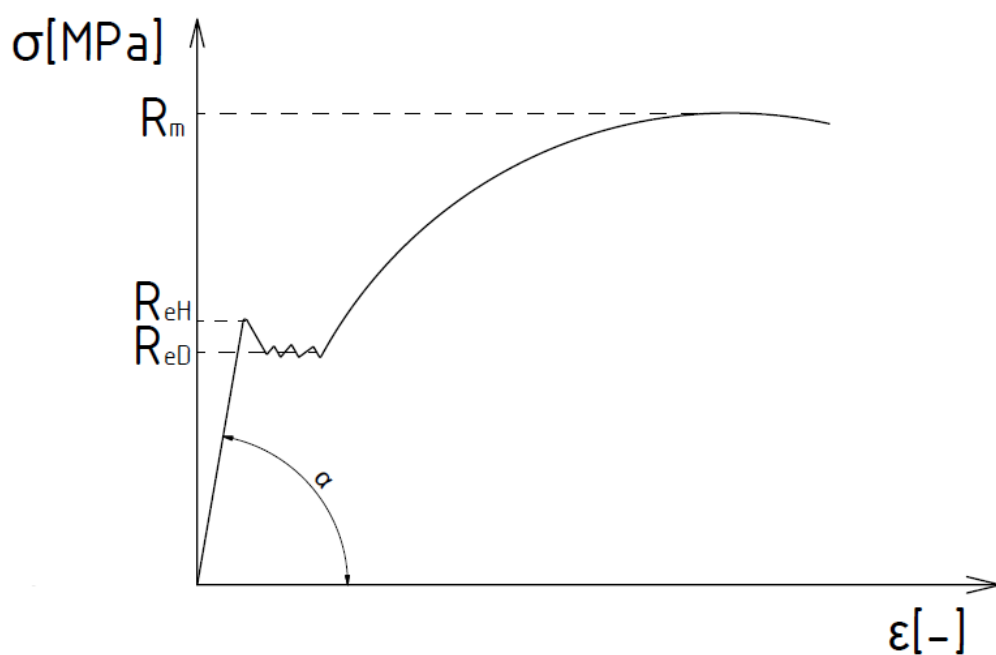
b) Nevýrazná mez kluzu se používá pro materiály s nevýraznou mezí kluzu (viz obr. 1.5):

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1.9)$$

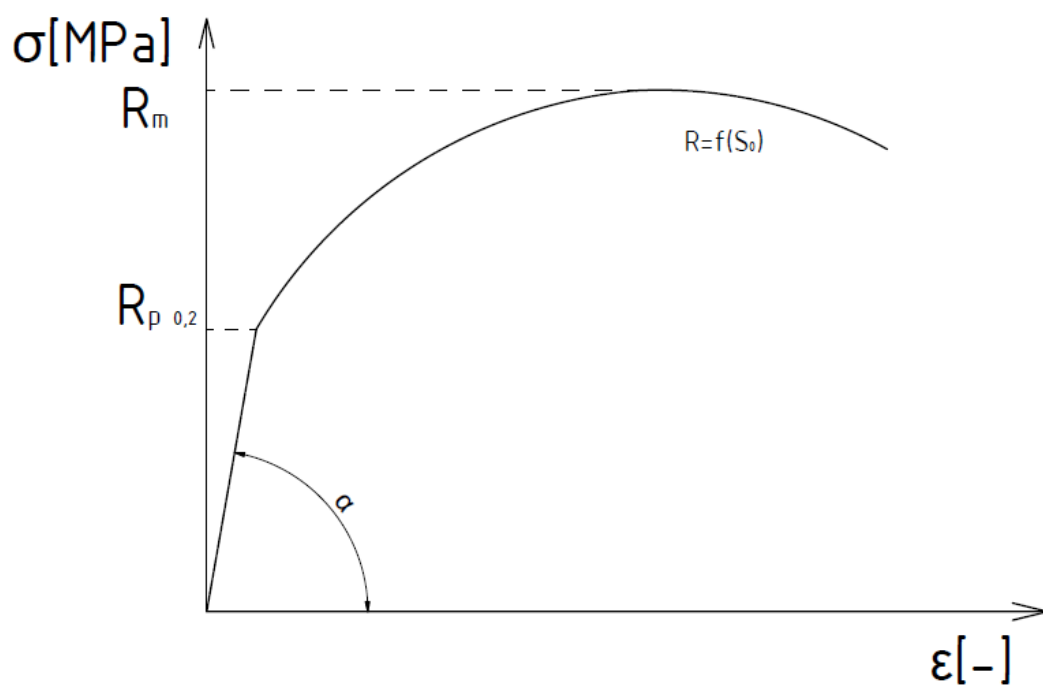
### 1.1.4 Mez pevnosti

Mez pevnosti  $R_m$  je hodnota napětí (viz vztah 2.0), těsně před tvorbou krčku (viz obr. 1.4, 1.5). Po překročení hodnoty meze kluzu začne zatěžující síla klesat i přesto, že reálné napětí vztažené na reálný průřez v místě krčku roste (viz obr. 1.3). Krček se stále zužuje, až dojde k lomu a ukončení zkoušky. Hodnota meze pevnosti  $R_m$  je podstatná materiálová charakteristika, podle které se klasifikují a rozdělují konstrukční materiály. Hodnota meze pevnosti je méně vhodná pro konstrukční výpočty [4, 5, 6, 7].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2.0)$$



Obr. 1.4 Smluvní tahový diagram s výraznou mezí kluzu [4, 5, 6].



Obr. 1.5 Smluvní tahový diagram s nevýraznou mezí kluzu [4, 5, 6].

### 1.1.5 Tažnost

Tažnost  $A$  (viz vztah 2.1) je hodnota trvalého prodloužení  $\varepsilon_u$  (viz obr. 1.3) vyjádřená v procentech. Hodnota tažnosti je dána vztahem [4, 5, 6, 7]:

$$A = 100 \cdot \varepsilon_u = 100 \cdot \frac{\Delta L_u}{L_0} [\%] \quad (2.1)$$

$A$  – tažnost [%],

$\varepsilon_u$  – konečné poměrné prodloužení [-],

$\Delta L_u = (L_u - L_0)$  – absolutní přírůstek počáteční délky po přetržení [mm],

$L_u$  – konečná délka [mm],

$L_0$  – počáteční délka [mm].

Tažnost je uváděna buď jako celková nebo jako plastická. Plastická tažnost byla dříve označovaná jako homogenní tažnost. Plastická tažnost je označována indexem  $g$  (viz vztah 2.2) [4, 6, 7]:

$$A_g = 100 \cdot \varepsilon_g = 100 \cdot \frac{\Delta L_g}{L_0} [\%] \quad (2.2)$$

$A_g$  – homogenní tažnost [%],

$\varepsilon_g$  – maximální rovnoměrná poměrná deformace [-],

$\Delta L_g = (L_g - L_0)$  – přírůstek měřené délky při dosažení maximální rovnoměrné deformace [mm],

$L_g$  – maximální rovnoměrná deformace zvolené měřené délky tyče při dosažení maximální zatěžující síly [mm],

$L_0$  – počáteční délka [mm].

V případě použití krátké zkušební tyče je tažnost označována písmenem  $A$ . Pokud je použita pro tahovou zkoušku dlouhá zkušební tyč, je přidán index 11,3. Značení pro dlouhé zkušební tyče má tedy tvar  $A_{11,3}$ . Při používání nepoměrové zkušební tyče např.  $L_0 = 80\text{ mm}$ , se tažnost označuje  $A_{80\text{ mm}}$ . U tahové zkoušky s nepoměrovými tyčemi platí podmínka, že k lomu musí dojít v prostřední třetině měřené délky. Pokud by nedošlo k lomu v prostřední třetině měřené délky, může být hodnota výsledné tažnosti menší, než je hodnota skutečné tažnosti. Hodnotu tažnosti ze zkoušky, kdy nebyla splněna podmínka, lze přepočítat pomocí koeficientů. V praxi je však lepší tuto hodnotu nezapočítat a provést nové měření [4, 5].

Tažnost je určována v nezatíženém stavu tedy bez napětí, tj. po odpružení. Tažnost měřená v zatíženém stavu pod napětím je navíc opatřena indexem  $t$  ( $A_t, A_{gt}$ ) [4, 5].



Měření délky se během zkoušky provádí průtahoměrem. Průtahoměr nám zobrazí výsledné hodnoty, ze kterých je následně vyhodnocena tažnost. Jestliže pro měření nebyl použit průtahoměr, zjišťuje se konečná délka přiložením přetržených částí k sobě [4, 5, 7].

Hodnoty tažnosti  $A_g, A_{gt}$  (viz vztah 2.2) nejsou závislé na délce zkušební tyče. Tyto hodnoty znázorňují hodnotu tažnosti pro nekonečně dlouhou tyč. Stanovení plastického prodloužení nezabraňuje určení dalších parametrů materiálu, a to i v případě, že se zkušební vzorek před dosažením maximální rovnoměrné deformace odlehčí, následně přeměří a znovu vloží do zkušebního stroje [4, 5, 7].

### 1.1.6 Kontrakce

Kontrakce  $Z$  je definována jako poměr rozdílu průřezu přetrženého vzorku a počátečního vzorku k počátečnímu průřezu (viz vztah 2.3). Hodnota kontrakce se v praxi stanovuje pro kruhové tyče, protože tvar průřezu v místě lomu je přibližně kruhový [4, 5].

$$Z = 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_0} [\%] \quad (2.3)$$

$Z$  – kontrakce [%],

$\Delta S = (S_0 - S_u)$  – rozdíl počátečního a konečného průřezu [ $\text{mm}^2$ ],

$S_0$  – počáteční průřez [ $\text{mm}^2$ ],

$S_u$  – konečný průřez [ $\text{mm}^2$ ] [4, 5].

### 1.2 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost jako vlastnost materiálu je definována jako odpor proti vnikání cizího tělesa (indentoru) do materiálu. Použití zkoušek tvrdosti je v technické praxi velmi rozšířené. Jejich hlavní předností je jednoduchost a také to, že pro převážnou většinu zkoušek tvrdosti není nutné zhotovovat zkušební tělesa a měření probíhá přímo na zhotovené součásti [4, 5, 6].

Metody měření tvrdosti je možné rozdělit dle mnoha hledisek (viz tab. 1.1). Jedním z těchto hledisek je rozdělení dle principu na vrypové, vnikací, odrazové a porovnávací (viz tab. 1.1). Dalším z hledisek, podle kterých lze dělit zkoušky tvrdosti, je rychlost zatěžování. Dle rychlosti zatěžování dělíme zkoušky na dynamické a statické (viz tab. 1.1) [4, 5, 6].

Zkoušky vrypové a vnikací patří k nejpoužívanějším zkouškám tvrdosti. Princip těchto metod spočívá ve vyhodnocení vtisku, které zanechá indenter na povrchu. Tvar indentoru závisí na typu zkoušky, používané jsou např.: kulička, jehlan a kužel. Materiál, ze kterého je indenter zhotoven, musí mít dostatečnou tvrdost, proto se vyrábí např.: kalená ocel, karbidy a diamant [4, 5, 6].

### 1.2.1 Základní rozdělení zkoušek tvrdosti:

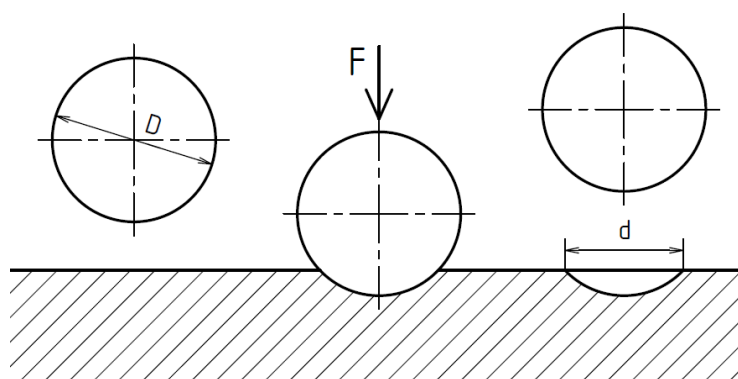
Tab. 1.1 Rozdělení metod zkoušení tvrdosti [5, 6]

Zkoušky makro tvrdosti	Statické	Vrypové	Metoda Martena
		Vnikací	Metoda Brinell
			Metoda Vickers
			Metoda Rockwell
	Dynamické	Plastické nárazové	Metoda volným pádem
			Metoda stlačenou pružinou
			Porovnávací metoda
		Elastické odrazové	Metoda volným pádem (Shorova)
Metoda kyvadlová (Duroskep)			
Zkoušky mikro tvrdosti	Statické	Vnikací	Metoda Vickers při zatížení do 4,9 N

### 1.2.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Definice zkoušky tvrdosti podle Brinella je hodnota tvrdosti vyjádřená jako poměr zatížení  $F$  k ploše vtisku  $A$  (viz vztah 2.4). Princip zkoušky spočívá ve vtlačování indentoru (kalená ocelová kulička o průměru  $D = 10; 5; 2,5; 2$  a  $1$  mm) do povrchu zkoušeného materiálu. Zatěžující síla je kolmá k povrchu zkoušeného materiálu. Působící síla vytvoří v materiálu kruhový vtisk, který následně slouží pro vyhodnocování tvrdosti dle Brinella. Parametrem pro vyhodnocování je průměr vzniklého vtisku. Průměr se vyhodnocuje pomocí mikroskopu ve dvou na sobě kolmých směrech [4, 5, 6, 7].

Aby byla zkouška dle Brinella platná, musí být dodržena určitá pravidla. Rozdíl mezi hodnotami průměrů vtisku nesmí být větší než 5 %. Hodnota průměru vtisku musí ležet v intervalu  $(0,25 - 0,6) \cdot D$ . Vzdálenost od okraje měřeného vzorku nesmí být menší než  $2,5 \cdot d$  a také vzdálenost mezi jednotlivými vtisky nesmí být menší než  $4 \cdot d$  [4, 5, 6, 7].



Obr. 1.6 Princip zkoušky tvrdosti podle Brinella [2, 3].

Tvrдость dle Brinella se vypočítá podle vztahu [4, 5, 6]:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} [HB] \quad (2.4)$$

HB – tvrdost dle Brinella [HB],

F – zatěžující síla [N],

D – průměr indentoru (kuličky) [mm],

d – průměr vtisku [mm],

A – plocha vtisku [mm<sup>2</sup>].

### 1.2.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Princip zkoušky tvrdosti dle Vickerse spočívá ve vtláčování pravidelného čtyřbokého diamantového jehlanu o vrcholovém úhlu 136° (viz obr. 1.7) do povrchu materiálu zatěžující silou. Působící síla při zkoušce tvrdosti dle Vickerse se pohybuje ve velkém intervalu. Dle působící síly lze zkoušku rozdělit (viz tab. 1.2) [4, 5, 7]:

Tab. 1.2 Rozdělení metody zkoušení tvrdosti podle Vickerse [2, 3].

Název	Zatížení F [N]	Zatížení F [kp]	Značení
Zkouška podle Vickerse	49,09 až 980,6	5 až 100	HV 5 až HV 100
Zkouška podle Vickerse při nízkém zatížení	1,961 až 29,418	0,2 až 3	HV 0,2 až HV 3
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	0,098 až 0,9806	0,01 až 0,1	HV 0,01 až HV 0,1

Postup zkoušky je detailně rozebrán v normě ČSN EN ISO 6507-1. Tato norma stanovuje požadavky nutné ke správnému provedení zkoušky. Tloušťka vzorku musí být nejméně 1,5 násobek průměrné délky úhlopříček. Další z podmínek je, že doba působícího zatížení se musí pohybovat v rozmezí od 10 do 15 s. Vzdálenost od kraje do středu vzniklého vtisku musí být nejméně 2,5 násobek průměrné délky úhlopříček [4, 5, 7].

Měření úhlopříček se provádí pomocí mikroskopu. Rozdíl ve velikosti mezi úhlopříčkami nesmí přesáhnout 5 %. Pro výpočet hodnoty tvrdosti (viz vztah 2.5) se používá aritmetický průměr změřených úhlopříček. Metoda měření tvrdosti dle Vickerse umožňuje měření

tvrdostí i na válcových nebo kruhových plochách. Při měření válcových nebo kruhových ploch se používají tzv. opravné součinitele, které předepisuje norma [4, 5, 6].

Výsledek zkoušky je závislý na kvalitě povrchu vzorku a také na homogenitě materiálu. Povrch vzorku by měl být jemně broušený případně leštěný. Vickersova zkouška je vhodná pro použití na jemné a homogenní materiály. Značná heterogenní a hrubá struktura může způsobit nejednoznačnost výsledků. Je to způsobeno tím, že během zkoušky je celý vtisk vtlačen pouze do jedné fáze případně zrna [4, 6].

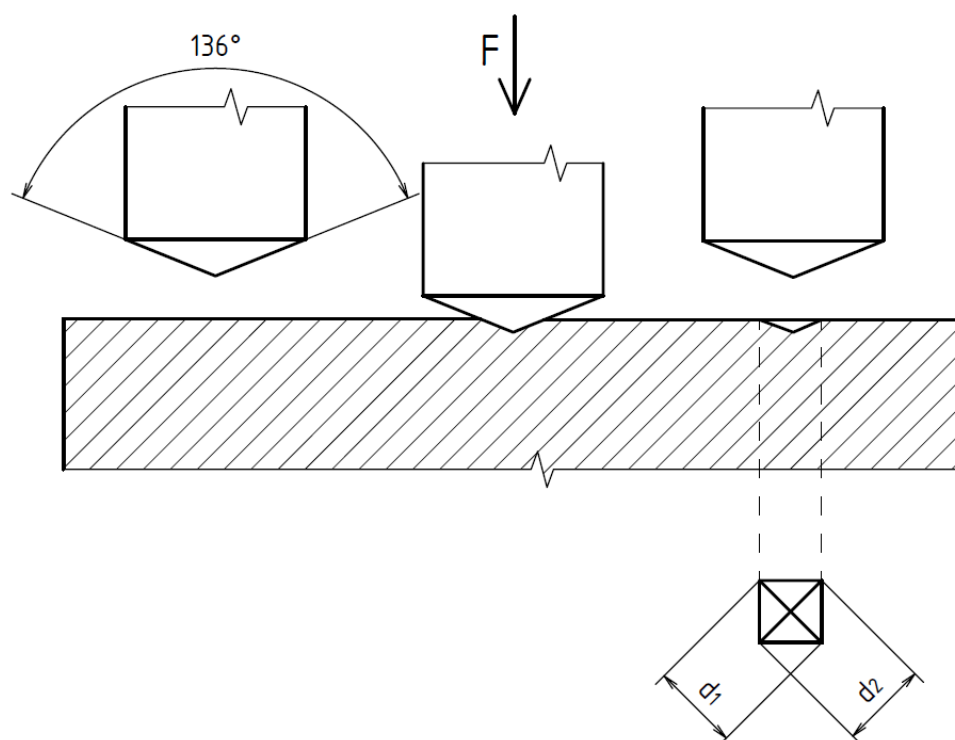
Tvrdość dle Vickerse se vypočítá podle vztahu [4, 5, 6]:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} [HV] \quad (2.5)$$

HV – tvrdość dle Vickerse [HV],

F – zatěžující síla [N],

d – aritmetický průměr délek obou úhlopříček.



Obr. 1.7 Princip zkoušky tvrdosti podle Vickerse [5, 6].

### 1.2.4 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Na rozdíl od zkoušek dle Vickerse a Brinella se hodnota stanoví jako rozdíl hloubky při zatížení dvěma velikostmi sil. Průběh zkoušky (viz obr. 1.8, 1.9) je proveden tak, že indentor se nejdříve zatíží silou  $F_0 = 10 \text{ kp}$  (98,07 N), čímž dojde k vtlačení indentoru do hloubky, kterou označujeme písmenem  $a$  (viz obr. 1.8, 1.9). Na měřicím zařízení se stanoví nulová hodnota. Následně dojde k zatížení přídatnou silou  $F_1$ . Výsledná síla je rovna součtu síly  $F_0$  a  $F_1$ . Přídatná síla musí působit po dobu 2 až 8 s, poté dojde k odlehčení na počáteční sílu  $F_0$ . Hloubka, ve které se po odlehčení na počáteční sílu  $F_0$  nachází indentor, je mírou tvrdosti [4, 5, 6].

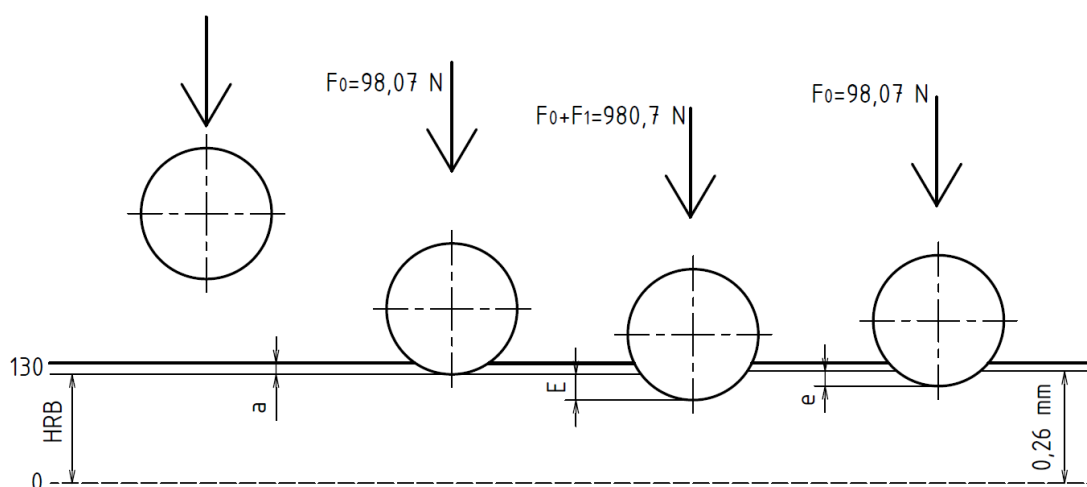
Při této zkoušce lze použít dva typy indentorů. Prvním typem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  (poloměr zaoblení vrcholu kužele je 0,2 mm). Druhým typem je kulička z tvrdokovu nebo kalená o průměru 1/16 in (1,5875 mm) nebo 1/8 in (3,175 mm) [4, 5, 6].

Podmínky zkoušky jsou dány dle normy ČSN EN ISO 6508-1 a aby byla zkouška platná, je nutné dodržet určitá pravidla jako u zkoušek Vickerse a Brinella. Tloušťka vzorku musí být při použití kužele nejméně desetinásobek hloubky vtisku a u kuličky nejméně patnáctinásobek hloubky vtisku [4, 5, 7].

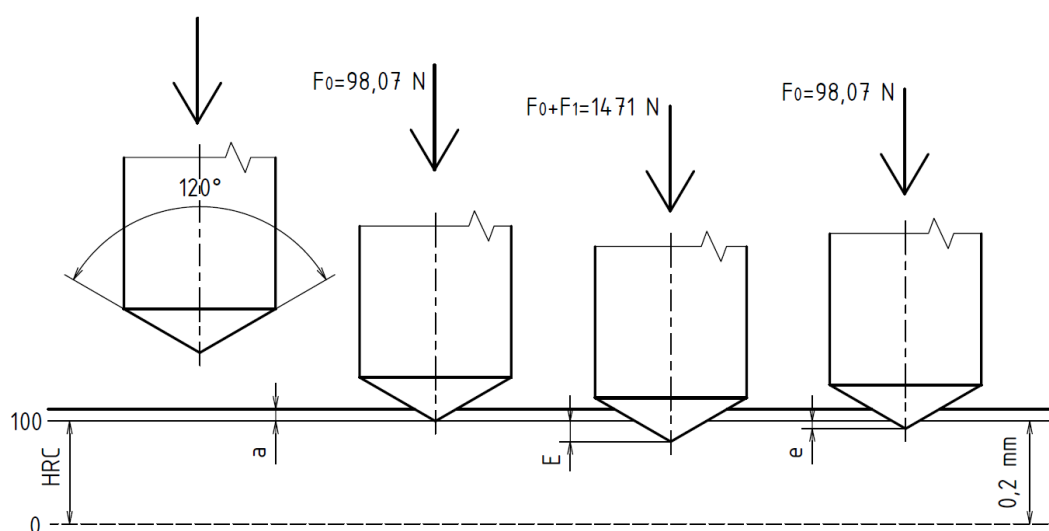
Tvrdost dle Rockwella se označuje HR plus další písmeno. Třetí písmeno označuje druh použité stupnice. Nejčastěji se používá HRC a HRA. Při těchto zkouškách je použit diamantový kužel nebo HRB (kulička o průměru 1/16 in) (viz tab. 1.3) [4, 5, 7].

Tab. 1.3 Rozdělení metody zkoušení tvrdosti podle Rockwella [5, 6].

Stupnice tvrdosti	Indentor	$F_0$ [N]	$F_1$ [N]	$F$ [N]	Značka tvrdosti
A	Kužel	98,07	490,3	588,4	HRA
B	Kulička 1/16 in	98,07	882,6	980,7	HRB
C	Kužel	98,07	1373	1471	HRC
D	Kužel	98,07	882,6	980,7	HRD
E	Kulička 1/8 in	98,07	882,6	980,7	HRE
F	Kulička 1/16 in	98,07	490,3	588,4	HRF
G	Kulička 1/16 in	98,07	1373	1471	HRG
H	Kulička 1/8 in	98,07	490,3	588,4	HRH
K	Kulička 1/8 in	98,07	1373	1471	HRK



Obr. 1.8 Princip zkoušky tvrdosti HRB [5, 6].



Obr. 1.9 Princip zkoušky tvrdosti HRC [5, 6].

### 1.2.5 Zkouška tvrdosti odrazem

Měření plastových materiálů se provádí různými metodami, protože neexistuje metoda, která by byla vhodná jak pro tvrdé reaktoplasty, tak i pro měkké elastomery. Pro měření tvrdých plastových materiálů se používá metoda měření tvrdosti dle Brinella (viz kapitola 1.2.2). Pro středně tvrdé a měkké plastové materiály se používá zkouška podle Shoreho [6, 8].

Podstata odrazové zkoušky dle Shoreho je ve měření výšky odrazu volně padajícího tělíska od povrchu zkoušeného materiálu. Jako zkušební tělísko se při odrazové zkoušce dle Shoreho používá diamantový indentor s kulově zabroušeným hrotem. Tento indentor je upevněn na závaží. Závaží padá (ve skleněné trubce) z určité výšky na povrch materiálu. Při dopadu indentoru se vytvoří nepatrný vtisk, čímž dojde ke ztrátě části energie.

Zbytek energie je spotřebován v odrazu od materiálu. Čím větší dosažená výška odrazu je během zkoušky dosažena, tím větší je tvrdost materiálu. Výška odskoku závisí jak na tvrdosti materiálu, tak i na jeho modulu pružnosti [5, 6, 8].

Zařízení používané pro Shoreho zkoušku se nazývá Shoreho skleroskop, který je osazen stupnicí rozdělenou na 140 dílků [5, 6].

### 1.3 Měření drsnosti povrchu

Výsledná drsnost povrchu je propojená s vlastním procesem výroby součástí. Drsnost povrchu je nevyhnutelná, lze pouze měnit její výslednou podobu. Na kvalitu povrchu má vliv několik základních hledisek:

- geometrie nástroje,
- kinetika pohybu nástroje (řezné podmínky),
- kmitání celku stroj, nástroj, obrobek,
- obráběný materiál [9, 10, 11].

#### 1.3.1 Metody měření drsnosti povrchu

V dnešní době existuje velké množství typů metod používaných pro vyhodnocování drsnosti povrchu. Každá metoda má své výhody a nevýhody. Jednotlivé metody jsou používány vzhledem k požadavkům na vyhodnocení povrchu [9, 10, 11].

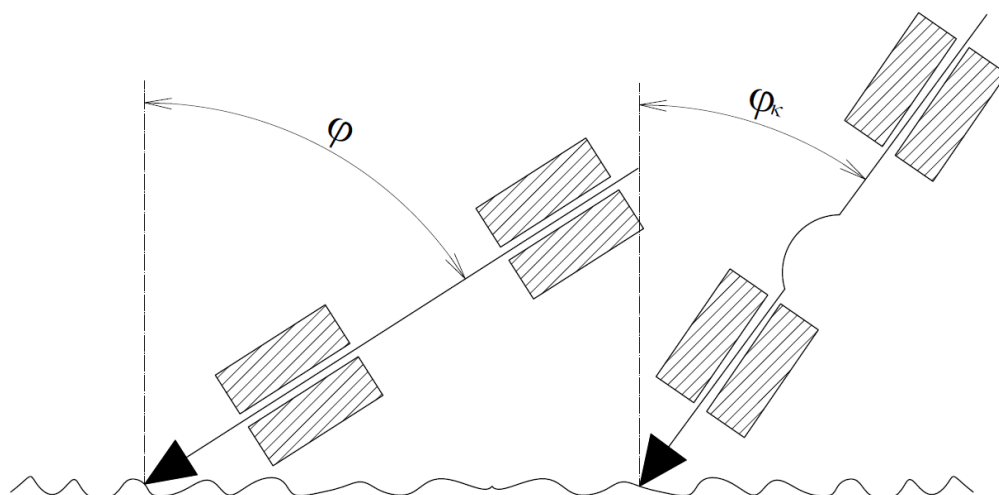
#### Kvalitativní vyhodnocování

Princip této metody je založen na porovnání hodnocených povrchů se vzorky o známé drsnosti. Porovnání povrchů se provádí hmatem, vizuálně nebo za použití pomůcek (lupa nebo komparační mikroskop). Přesnost této metody při vizuální kontrole je přibližně 70  $\mu\text{m}$ . Nej přesnější vyhodnocení se dosahuje hmatem. Nehtem přejíždíme po povrchu materiálů a srovnáváme je se vzorky o předepsané drsnosti, při této metodě lze dosáhnout i přesnosti 0,1  $\mu\text{m}$  [9, 10, 11].

#### Nepřímá kvantitativní měření

K vyhodnocení povrchu touto metodou se používají zařízení, která jsou vybavena buď mechanickými, pneumatickými, elektrickými nebo fotoelektrickými komparátory [9, 10, 11].

Mechanický komparátor (pružná planžeta) je na konci vybaven hrotem ze slinutého karbidu. Komparátor zakončený hrotem opře o povrch pod určitým úhlem  $\varphi$ . Pokud je hodnota úhlu  $\varphi$  velká, hrot po povrchu lehce klouže, ale pokud se úhel začne zmenšovat až dosáhne  $\varphi_k$ , hrot se zadrhne a planžeta se ohne (viz obr. 1.10). Úhel, při kterém dojde k pronutí, je následně přepočítán na drsnost [9, 10, 11].



Obr. 1.10 Nepřímé kvantitativní měření pomocí mechanického komparátoru [10].

### Dotykové profiloměry

Měření pomocí dotykových profiloměrů patří v dnešní době k nejpoužívanější metodě měření drsnosti povrchu. Princip této metody spočívá v měření s pomocí hrotu, který se posouvá konstantní rychlostí přes měřený povrch (někdy může hrot stát a posouvá se vzorek). Hrot je zhotoven s velmi malým poloměrem, což umožňuje měření i velmi malých změn na povrchu. Hrot vlivem morfologie povrchu mění výškovou polohu, která je následně vyhodnocena a zaznamenána [9, 10, 11].

### Optické metody

Tyto metody patří k nejpresnějším metodám měření drsnosti povrchu. Princip těchto metod je založený na dopadu paprsku na vyhodnocovaný povrch. Po dopadu paprsku na povrch dochází k následnému vyhodnocení. Druh vyhodnocení je závislý na použité metodě [10, 11].

#### 1.3.2 Parametry profilu povrchu

Pro měření profilu jsou nejčastěji používány parametry označované jako 2D. Hodnoty 2D parametrů se určují z dvojrozměrného profilu. Norma ISO 4287 stanovuje základní tři skupiny: profil (P), drsnost (R), vlnitost (W), každá skupina zahrnuje další parametry. Celkem norma definuje 14 parametrů [10, 11].

Mezi nejpoužívanější typy parametrů pro hodnocení povrchu patří:

- $R_a$  – střední aritmetická úchylka (viz vztah 2.6), (viz obr. 1.12),
- $R_z = R_p + R_v$  – největší výška profilu drsnosti (viz obr. 1.11),
- $R_q$  – průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti,
- $R_p$  – maximální výška profilu drsnosti (viz obr. 1.11),
- $R_v$  – maximální hloubka profilu drsnosti (viz obr. 1.11) [10, 11].



Hodnota střední aritmetické úchylky se vypočítá dle vztahu (viz vztah 2.6) [10, 11]:

$$Ra = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y(x)| dx \doteq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)| \quad (2.6)$$

$Ra$  – střední aritmetická úchylka (viz obr. 1.12),

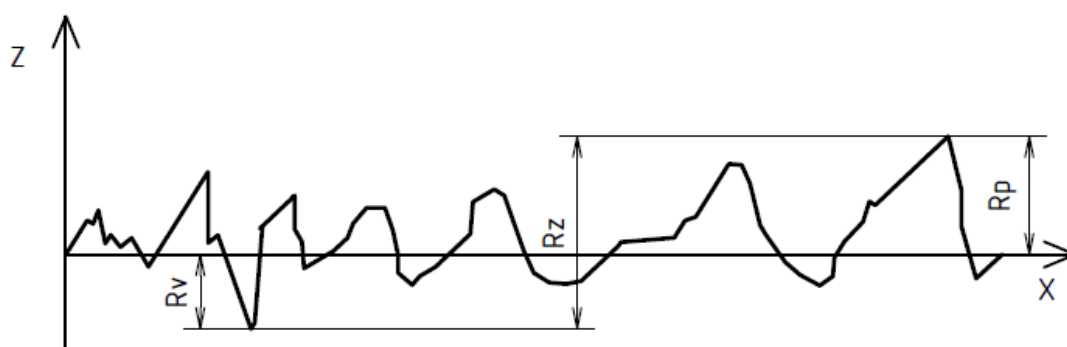
$l$  – základní délka [mm],

$y(x)$  – funkce popisující profil,

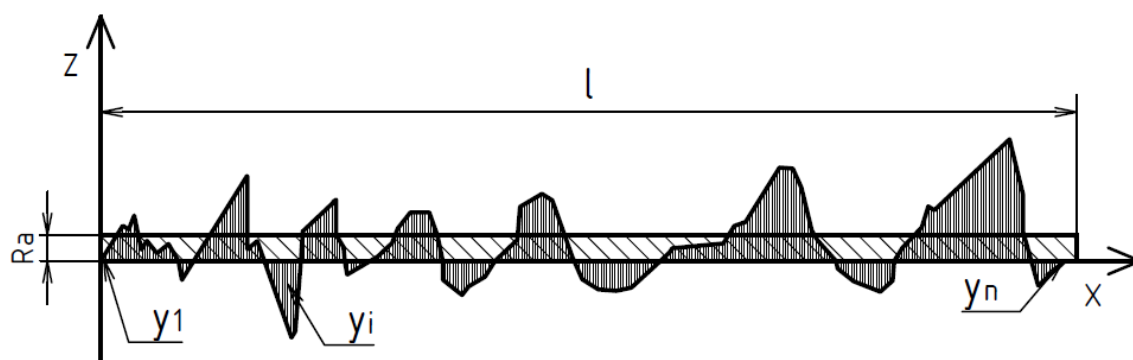
$x$  – úsečka profilu odečtená na střední čáře [mm],

$n$  – počet prvků profilu,

$y_i$  – souřadnice  $n$  bodů profilu.



Obr. 1.11 Maximální výška profilu [10, 11].



Obr. 1.12 Střední aritmetická úchylka [10, 11].

#### 1.4 Rozbor materiálů

Plasty označujeme jako materiály, kde základ je tvořen polymerem a dalšími přísadami, které ovlivňují jejich vlastnosti. Polymer je makromolekulární látka, které má jinou strukturu i chování než kovové materiály. Strukturu v kovových materiálech tvoří krystalická mřížka. Krystalickou mřížku tvoří jednotlivé atomy, které jsou navzájem provázány pevnými meziatomovými vazbami. Plasty jsou na rozdíl od kovu tvořeny makromolekulárními řetězci. Makromolekulární řetězec je tvořen dlouhými molekulami s opakujícími se základními strukturními jednotkami [8, 13, 14, 15].

Plastové materiály patří k poměrně novým materiálům. Protože jejich vlastnosti vynikají svojí všestranností a poměrně dobrou zpracovatelností v určitých oblastech, jsou srovnatelné s kovovými materiály a někdy je i nahrazují. Hlavní surovinou pro výrobu plastových materiálů je ropa a uhlí. Plastové hmoty jsou tvořeny dvěma základními složkami: pojivem (nejčastěji se používá pryskyřice), plnivem (různé typy materiálů - anorganické, organické, práškové, vláknité) a přísadami (dodávají materiálům potřebné vlastnosti a barvu) [8, 13, 14, 15].

Plastové materiály rozdělujeme dle několika hledisek.

a) Podle chování při ohřevu:

- reaktoplasty,
- termoplasty [8, 13].

b) Podle použití:

- technické pryskyřice,
- tvrditelné lisovací hmoty,
- hmoty za tepla tvárné,
- vrstvené hmoty,
- lité a pěnové hmoty,
- fólie,
- umělé kůže,
- umělá vlákna,
- lepidla [8, 13].

c) Podle nadmolekulární struktury:

- amorfní (makromolekuly jsou nahodile uspořádány),
- krystalické (makromolekuly jsou uspořádány pravidelně) [8, 13].

d) Podle polaritu:

- polární (mají trvalý dipól),
- nepolární (nemají trvalý dipól) [8, 13].

### 1.4.1 Termoplasty

Termoplasty se vyznačují schopností opakovaného ohřátí do stavu taveniny nebo viskózního toku na rozdíl od reaktoplastů. Tato vlastnost umožňuje opakované využití a recyklaci materiálů [8, 12, 14, 16].

Termoplasty lze vyztužit, což zvyšuje jejich pevnostní charakteristiky. Materiály, které se používají pro vyztužení termoplastů, se dělí na:

- krátká vlákna (0,2 mm),
- dlouhá vlákna (až 25 mm, materiály LFT),
- nekonečně dlouhá vlákna (vyztužení skleněnou rohoží typ GMT, tkaninou nebo pásy) [8, 12].

Podstata zpracování termoplastů:

- 1) polymer,
- 2) míchání a granulace (během procesu jsou dodávány přísady, které ovlivňují vlastnosti materiálu),
- 3) granulát,
- 4) zpracování požadovanou technologií (ohřev do stavu taveniny a následné ochlazení do tuhého stavu),
- 5) polotovar nebo výsledná součást [8, 12].

**Polyethylen (PE)** se vyznačuje nepolárním charakterem a má uspořádanou strukturu. Rozlišujeme dva základní typy [8, 14, 16].

- Polyethylen rozvětvený je měkký, houževnatý materiál (viz tab. 1.4), který je odolný proti olejům, zásadám a také kyselinám. Je náchylný na stárnutí vlivem povětrnostních podmínek. Pro zlepšení odolnosti proti stárnutí se do materiálu přidávají saze [8, 14, 16].

Tento typ polyethylenu se používá pro nenáročná těsnění, zemědělské použití, vlnovce, fólie a potrubní spojky [8, 14, 16].

- Polyethylen lineární na rozdíl od rozvětveného je tvrdší a pevnější (viz tab. 1.4). Vyznačuje se také nižší houževnatostí než rozvětvený. Odolnost vůči chemickým látkám je stejná jako u rozvětveného [8, 14, 16].

Použití je především pro vodovodní potrubí, tvarovky a kanystry [8, 14, 16].

Tab. 1.4 Mechanické vlastnosti materiálu polyethylen [8, 12, 16].

Druh	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Teplota tavení [°C]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Permitivita	Nasákavost [%]
Lineární	200 až 800	8 až 22	120 až 137	-110 až -122	914	2,3	< 0,01
Rozvětvený	1000 až 1400	22 až 35	120 až 137	-110 až -122	960	2,3	< 0,01

**Polypropylen (PP)** má vlastnosti velmi podobné polyethylen. Na rozdíl od něho se však vyznačuje nižší hustotou a vyšší teplotou tavení (viz tab. 1.5). Nevýhodou je nižší houževnatost při teplotách v okolí 0 °C a menší propustnost [8, 14, 16].

Použití tohoto materiálu je především pro potrubí, spojky a tvarovky pro horkou vodu, také se z něho vyrábějí oběžná kola ventilátorů a tělesa čerpadel [8, 14, 16].

Tab. 1.5 Mechanické vlastnosti materiálu polypropylen [8, 12, 16].

Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Teplota tavení [°C]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Permitivita	Nasákavost [%]
1100 až 1300	21 až 37	176	-24	900 až 907	2,2	0,01 až 0,03

**Polyvinylchlorid (PVC)** se vyznačuje dobrou pevností (viz tab. 1.6), je také tvrdý ale zároveň křehký. Tento typ lze zpracovávat technologií vytlačováním, tvarováním a vstřikováním. Lze ho také svařovat a lepit. Polyvinylchlorid patří mezi nejpoužívanější druhy materiálů [8, 14, 16].

Tento typ materiálu se používá pro chemický průmysl, odpadní a vodovodní potrubí a jako kyselinovzdorné vyložení nádrží [8, 14, 16].

Tab. 1.6 Mechanické vlastnosti materiálu polyvinylchlorid [8, 12, 16].

Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Teplota tavení [°C]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Permitivita	Nasákavost [%]
2400 až 4200	40 až 60	75	75	1390 až 1959	2,8 až 3,05	0,04 až 0,4

**Polystyren (PS)** je tvrdý a křehký materiál. Polystyren se vyznačuje amorfni strukturou (nepravidelné uspořádání makromolekul) a také nepolární povahou. Je vhodný pro použití v prostředí s přítomností kyselin a zásad. Má vynikající elektroizolační a dielektrické vlastnosti [8, 14, 16].

Použití tohoto materiálu je vhodné převážně pro elektrotechniku, tlačítka a víčka. Lepší použití má tzv. houževnatý polystyren (HIPS), který se vyznačuje větší houževnatostí ale nižší pevností (viz tab. 1.7) [8, 14, 16].

Tab. 1.7 Mechanické vlastnosti materiálu polyvinylchlorid [8, 12, 16].

Druh	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Teplota tavení [°C]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Permitivita	Nasákavost [%]
PS	2865 až 3275	65	92	92	1050	2,5	0,01 až 0,03
HIPS	2275 až 2658	35	92	92	1030	2,5	0,01 až 0,03

**Polyamidy (PA)** se vyznačují svojí pevností, houževnatostí a vysokou odolností proti opotřebení. Jsou náchylné na creep. Polyamidy jsou odolné proti slabým zásadám, olejům a rozpouštědlům. Nejsou však odolné proti působení kyselin. Největší význam mají tzv. alifatické polyamidy. U těchto typů polyamidu se střídají základní amidové řetězce s alifatickými částmi. Pro dělení alifatických polyamidů se používají čísla, která udávají počet atomů uhlíku. Nejpoužívanější typy alifatických polyamidů jsou polyamid 6 (PA 6) a polyamid 6,6 (PA 66) [8, 14, 16].

PA 6 vyniká svojí houževnatostí. Mezi jeho nevýhody patří velká nasákavost (viz tab. 1.8), což způsobuje značnou rozměrovou nestabilitu. Použití tohoto typu polyamidu je převážně na řemenice, kladky, silentbloky, lana a části spojek [8, 14, 16].

PA 66 je pevný materiál (viz tab. 1.8), který se vyznačuje svojí odolností proti opotřebení. Podobně jako u polyamidu PA 6 má PA 66 velkou nasákavost. PA 66 se používá na ozubená kola, vačky, kluzná ložiska, klece valivých ložisek, šrouby a matice [8, 14, 16].

Tab. 1.8 Mechanické vlastnosti materiálu polyvinylchlorid [8, 12, 16].

Druh	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Teplota tavení [°C]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Permitivita	Nasákavost [%]
PA 6	1200 až 1400	70 až 85	220	40	1130	3,4	1,3 až 1,9
PA 66	1600 až 2000	77 až 84	265	65	1140	4,0	1,0 až 2,8

**Polykarbonát (PC)** je termoplast vyznačující se amorfní strukturou (nahodilé uspořádání makromolekul), který je poměrně tuhý a pevný (viz tab. 1.9). Tento druh polymeru se vyznačuje svojí houževnatostí a odolností proti působení rázové síly. Je odolný vůči působení slabých kyselin, benzínům a olejům. Není odolný proti působení zásad a uhlovodíků [8, 16].

Tento termoplast se používá na ochranné kryty, průhledy a kryty světel [8, 16].

Tab. 1.9 Mechanické vlastnosti materiálu polykarbonát [8, 12, 16].

Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Teplota tavení [°C]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Permitivita	Nasákavost [%]
2100 až 2400	56 až 72	114	114	1200	3,0	0,15

#### 1.4.2 Reaktoplasty

Reaktoplast je druh plastu, který lze za pomoci zdroje tepla nebo katalyzátoru uvést do netavitelného nebo nerozpustného stavu. Podstatou tohoto procesu je chemická reakce, při které dochází k vytváření kovalentních příčných vazeb mezi makromolekulami. Této reakci se v praxi říká vytvrzování a u kaučuku je tento proces označován jako vulkanizace. Proces této reakce je nevratný a reaktoplasty se stávají nerozpustnými a netavitelnými, proto je recyklace reaktoplastů obtížnější a její postup je odlišný od recyklace termoplastů [8, 12, 14].

Podstata zpracování reaktoplastů:

- 1) nízkomolekulární polymer,
- 2) míchání a impregnace (během procesu jsou dodávány přísady, které ovlivňují vlastnosti materiálu),
- 3) lisovací hmoty,
- 4) zpracování (chemická reakce vytvrzování),
- 5) polotovar nebo výsledná součást [8, 12, 14].

**Reaktivní pryskyřice** patří k nejpoužívanějším reaktoplastům při výrobě kompozitu. Pryskyřice jsou buď kapalné nebo tavitelné a k procesu vytvrzování pak dochází samostatně nebo s pomocí tvrdidel (katalyzátory, urychlovače, fenolů) [10, 14].

**Kaučuky** tvoří základní surovinu pro výrobu pryže. Kaučuk je polymer, který má v makromolekulárním řetězci dvojité vazby, které umožňují chemickou reakci. Ta se nazývá vulkanizace. Teplota, při které dochází k vulkanizaci se pohybuje v rozmezí 150 až 200 °C. Další podmínkou, aby došlo k vulkanizaci, je přítomnost činidla. Jako nejpoužívanější činidlo se používá síra. Výsledkem vulkanizace je, že z kaučuku vzniká pryž [8, 12, 14].

Mezi hlavní přednosti pryže patří její schopnost elastické deformace. Hodnoty deformací se u pryže pohybují v rozmezí 100 až 500 % při působení tahového napětí. Mezi další výhody pryže patří dobrá odrazová schopnost, odolnost proti opotřebení, chemická odolnost, nepropustnost vody ani plynů a elektroizolační vlastnosti [8, 12, 14].

Druhy kaučuků:

- kaučuky pro všeobecné použití – výroba pneumatik, hadic a různé výlisky,
- polybutadienový kaučuk – použití jako přísada pro zvýšení houževnatosti plastů,
- Olejovzdorné kaučuky – použití pro technické pryže a lepidla,
- Teplovzdorné kaučuky – teplotní odolnost do 250 °C krátkodobě až 350 °C [12,14].

#### 1.4.3 Porovnání termoplastů vs. reaktoplastů

V dnešní době existuje velké množství různých druhů termoplastů a reaktoplastů. Každý druh polymeru má své specifické vlastnosti, které jsou charakterizovány svojí skupinou. Termoplasty mají v porovnání s reaktoplasty určité výhody a naopak (viz tab. 2.0). Každý druh je určen pro různé použití při různých podmínkách [12, 14, 16].

Tab. 2.0 Porovnání vlastností termoplastů vs. reaktoplastů [12, 14, 16].

	Termoplasty	Reaktoplasty
Matrice	Polymerová, vysokoviskozní tavenina	Nevytvrzená, nízkoviskozní, lze ji spojovat lepením
Cena matrice	Vysoká i nízká	Nízká
Skladování	Neomezené skladování	Omezené skladování, nutné v chladu (dochází k pomalé reakci)
Polotovar	Granulát	Lisovací hmoty
Teplota zpracování	Teplota taveniny (viz tab. 1.4 až 1.9)	Teplota okolí

Tvarování	Použití pro velkosériovou výrobu	Není vhodné
Teplota lisovacího nástroje	Teplota taveniny (viz tab. 1.4 až 1.9)	Teplota 140 až 160 °C
Lisovací tlak	GTM: 200 až 300 MPa LFT: 30 až 100 MPa (viz kap.1.4.1)	20 až 50 MPa
Mechanické vlastnosti	Houževnaté, náchylné ke křípu	Odolné proti dynamickému zatěžování, křehký lom
Vliv změny teploty	Výrazné změknutí po překročení teploty skelného přechodu (viz tab. 1.4 až 1.9)	Menší vliv změny teploty
Stárnutí	Málo odolné i odolné	Výborná odolnost
Možnost opravy	Omezená	Dobrá



## **2 CHARAKTERISTIKA A ROZBOR APLIKOVANÉ TECHNOLOGIE 3D TISKU (TECHNOLOGIE 3D TISKU)**

Technologie 3D tisku, jinak známá pod názvem Rapid prototyping, patří k poměrně novým technologiím. První dostupný 3D tisk se vyskytl v 80. letech 19. století, ale k většímu užívání došlo až začátkem 21. století. Princip technologie 3D tisku spočívá v postupném kladení jednotlivých vrstev o konstantní tloušťce (aditivní metoda) na sebe, až dojde k vytvoření požadované součásti [1, 2, 17, 19].

Primárně je tato metoda určena k výrobě prototypů. Její hlavní předností je, že k výrobě prototypového dílu není potřeba vyrábět složité a nákladné formy. Prototypový díl může být vyroben z různého typu materiálu. Typ materiálu (pryskyřice, termoplast, vosk nebo kovový prášek) je odvislý od použité technologie [1, 2, 17, 19].

Technologie rapid prototyping se využívá v řadě odvětví, např.: v automobilovém a leteckém průmyslu a také ve zdravotnictví při výrobě implantátů. V průmyslových odvětvích se technologie rapid prototyping používá především k ověření smontovatelnosti soustavy. V současnosti se stále častěji začínají používat výrobky vytvořené pomocí 3D tisku přímo do konečných součástí. Hlavním důvodem je schopnost vytvořit tvarově složité (jak zevně, tak i vnitřně) součásti, což vede k úspoře hmotnosti [1, 2, 18, 19].

### **2.1 Technologie 3D tisku na bázi tuhých materiálů**

Pro tuto skupinu technologií 3D tisku je typické, že materiál je v tuhé fázi (fólie, drát navinutý na cívce). Do této skupiny patří technologie LOM, FDM, MJM (viz kapitoly 2.1.1 až 2.1.3) [1, 18, 19].

#### **2.1.1 Technologie Laminated Object Manufacturing**

Pro technologii Laminated Object Manufacturing se velmi často používá zkratka LOM. Pro tuto technologii se používá materiál ve formě fólií. Objekt vzniká kladením jednotlivých vrstev fólií na sebe. Fólie je z jedné strany opatřena lepivým nátěrem, který zajišťuje spojení jednotlivých fólií k sobě. Aby bylo zajištěno dokonalé přilnutí následující fólie, je každá vrstva stlačena pomocí lisovacího válce ohřátého na 330 °C (viz obr. 2.0). Kontura součásti je následně vyřezána pomocí laseru. Přebytná fólie slouží jako podpora pro tvorbu součástí [1, 18, 19].

Po dokončení součásti je výrobek odstraněn z nosné desky, je odstraněn nosný rám a dojde k odstranění přebytečné fólie. Hotový výrobek je možné následně brousit, obrábět nebo jinak povrchově upravovat [1, 18, 19].

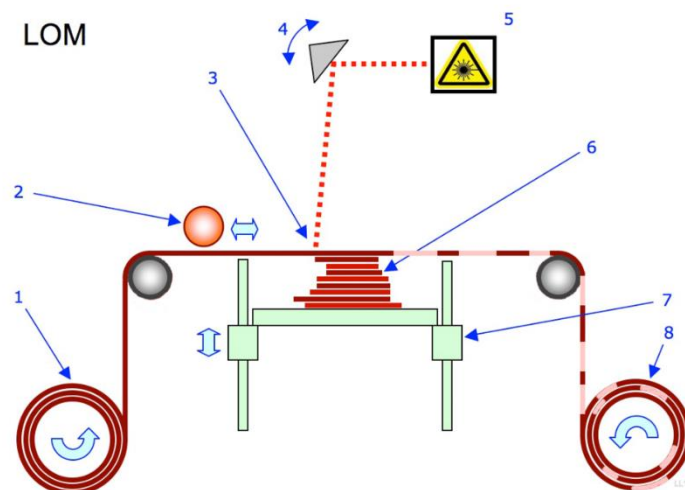
Tato technologie se především používá k výrobě předmětů určených k propagaci a vizualizaci. Tyto výrobky lze také používat jako vstřikovací a odlévací formy [1, 18, 19].

Výhody:

- použití velké škály materiálů (papír, plasty, keramika a kompozitní materiály),
- rychlost výroby,
- tvorba modelu bez podpor,
- ve zhotovené součásti nevznikají zbytková pnutí [1, 18, 19].

Nevýhody:

- nutná kontrola nastavení laseru (nebezpečí narušení předešlé vrstvy),
- problematická výroba tenkostěnných modelů,
- pevnost je dána vlastnostmi pojiva [1, 18, 19].



Obr. 2.0 Princip technologie LOM: 1- fólie, 2-výhřívavý válec, 3-laserový paprsek, 4-skenovací hranol, 5-laserový zdroj, 6-model, 7-pohyblivý stůl, 8-odpad [21].

### 2.1.2 Technologie Fused Deposition Modeling

Fused Deposition Modeling ve zkratce FDM. Výchozí materiál je ve formě drátu navinutého na cívce. Podstatou této technologie je nanášení tenkých vrstev materiálu po vrstvách. Drát je s pomocí kladek vtlačován do předehřáté trysky (viz obr. 2.1), čímž dochází k natavení. Tryska dávákuje roztavený materiál a vytváří tak jednotlivou vrstvu. Po dokončení jedné vrstvy klesne podložka o předem stanovenou hodnotu a proces nanášení další vrstvy se opakuje [1, 18, 19].

Tato technologie vyžaduje stavbu podpory. Podpory slouží jako opora pro stavební materiál při tvorbě dutin a převisů. Tisková hlava je opatřena dvěma tryskami. Jedna tryska slouží pro dávkování stavebního materiálu a druhá pro podpurný materiál [1, 18, 19].

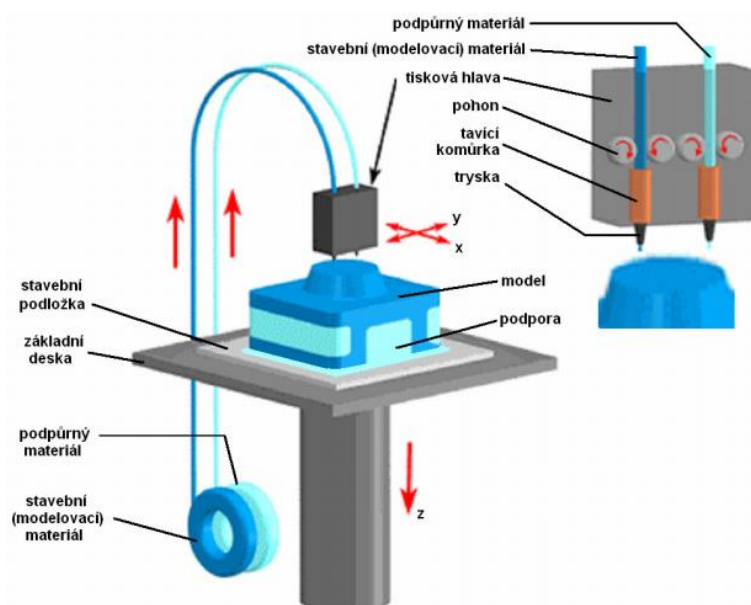
Po dokončení výrobku dojde k odstranění z podložky. Dalším krokem je odstranění podpory vniklých během procesu tisku. Odstraňují se buď mechanicky nebo při použití rozpustných podpory rozpouštěním ve speciálním roztoku [1, 18, 19].

Výhody:

- výroba funkčních prototypů,
- odpad tvoří pouze podpory,
- snadné odstranění podpory [1, 18, 19].

Nevýhody:

- omezená přesnost (závisí na druhu použitého materiálu a průměru dávkovací trysky),
- smrštění během procesu chladnutí [1, 18, 19].



Obr. 2.1 Princip technologie FDM [22].

### 2.1.3 Technologie Multi Jet Modeling

MJM je zkrácení anglického výrazu Multi Jet Modeling. Podstata této technologie spočívá v postupném nanášení vrstvy termopolymery. Při technologii MJM se využívá speciální tisková hlava, která má 352 trysek, které jsou uspořádány do řady. Tisková hlava přejíždí přes model a dle řídicího Softwaru je ovládáno dávkování materiálu příslušnou tryskou [16, 18].

Výhody:

- jednoduchost,
- produktivní výroba,
- ekonomická výroba [18, 19].

Nevýhody:

- malá přesnost,
- zhotovení menších součástí [18, 19].

## 2.2 Technologie 3D tisku na bázi fotopolymerů

Hlavním znakem technologie 3D tisku na bázi fotopolymerů je, že celý proces se děje uvnitř nádoby s kapalnou pryskyřicí. Pryskyřice je vytvrzována po jednotlivých vrstvách. Po vytvrzení jedné vrstvy dojde k posunu stolu o výšku následující vrstvy a po dokončení modelu je přebytečná pryskyřice odsáta [1, 2, 18].

### 2.2.1 Technologie Stereo Litography Apparatus

StereoLitography Apparatus ve zkratce SLA. Tato metoda patří k nejstarším metodám výroby prototypů. První technologie tohoto druhu byla představena už v roce 1987 [1, 2, 18].

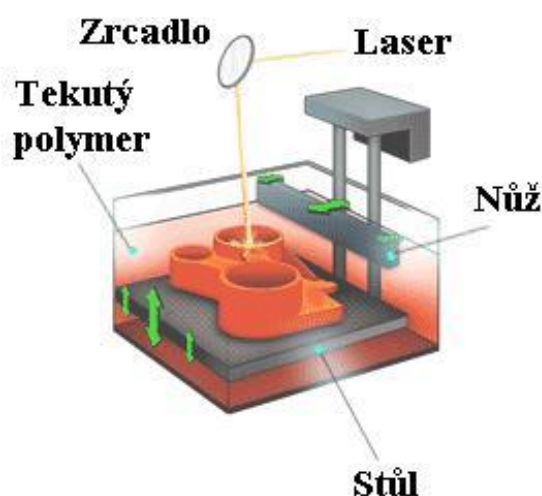
Podstata výroby modelů metodou SLA spočívá ve vytvrzování 2D vrstev kapalné pryskyřice laserovým paprskem. Po vytvrzení jedné vrstvy se tato vrstva zarovná (na požadovanou tloušťku 0,05 až 0,15 mm) stírací čepelí (viz obr. 2.2). Následně je celý stůl (nádoba s kapalnou pryskyřicí a model) posunutý o hodnotu tloušťky následující vrstvy a proces se opakuje, dokud není výrobek hotový. Po dokončení výrobku je z nádoby odsáta přebytečná pryskyřice, která je po přefiltrování připravena pro další využití. Následně dojde k vyjmutí. Model je nutné omýt, čímž dojde k odstranění přebytečné pryskyřice. Poté je nutné model vystavit působení UV záření, aby došlo ke konečnému vytvrzení. Tato technologie se používá především v automobilovém průmyslu pro výrobu modelů aut [1, 2, 19, 20].

Výhody:

- výroba velkých součástí,
- přesnost a kvalita povrchu,
- široká škála materiálů [1, 2, 18].

Nevýhody:

- dokončovací vytvrzování,
- následná úprava povrchu [1, 2, 18].



Obr. 2.2 Princip technologie SLA [23].

### 2.2.2 Technologie Solid Ground Cutting

Princip této technologie (zkráceně SGC) je podobný jako u technologie SLA (viz kapitola 2.2.1). Rozdíl je v tom, že k vytvrzování jedné vrstvy dochází najednou pomocí negativní šablony. Na šablonu je nanесena vrstva toneru (kontura tvaru zůstává), která slouží jako clona UV záření. Následně je šablona umístěna nad tenkou vrstvou pryskyřice. Působením UV lampy dojde k vytvrzení pryskyřice (viz obr. 2.3). UV záření prochází jen místy, kde není na šabloně nanесen toner, a tak vzniká tvar součásti (viz obr. 2.3) [1, 2, 18].

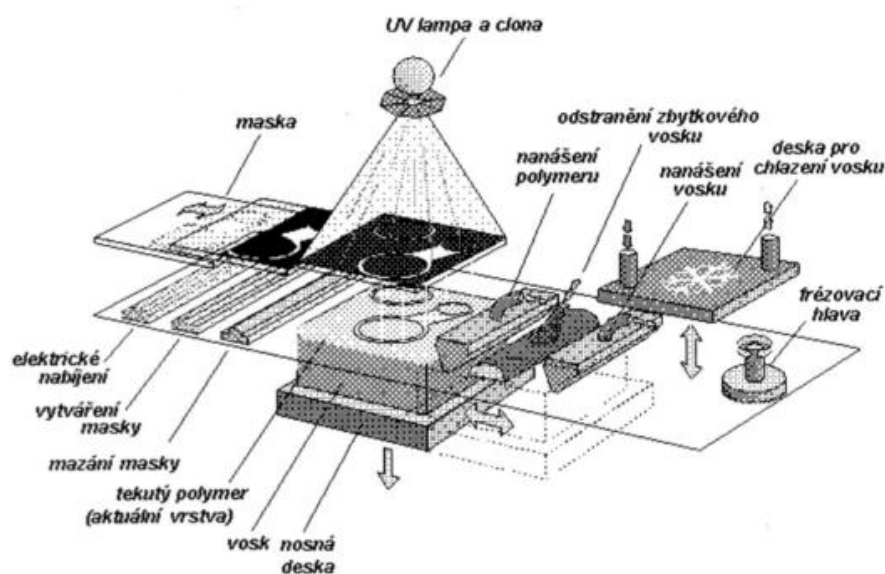
Použití této technologie je především k ověřování designu a smontovatelnosti součástí [1, 2, 18].

Výhody:

- minimální smrštění modelu,
- nevzniká zápach [1, 2, 18].

Nevýhody:

- rozměrné zařízení,
- tvorba odpadu,
- hlučnost zařízení [1, 2, 18].



Obr. 2.3 Princip technologie SGC [18].

### 2.3 Technologie 3D tisku na bázi práškového materiálu

Pro tento druh technologie je využíván materiál ve formě prášku, který je pomocí zdroje tepla nataven a dochází ke vzniku modelu [1, 18, 19].

### 2.3.1 Technologie Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering lze často najít pod zkratkou SLS. Proces probíhá v komoře vyplněné inertním plynem (dusík). Inertní plyn zabraňuje oxidaci během procesu spékání. Na počátku procesu tisku je na nosnou desku nanесena vrstva prášku. Nanášení se realizuje s pomocí válcového mechanismu (viz obr. 2.4), který zajistí rovnoměrnou a celistvou vrstvu. Následně je s pomocí CO<sub>2</sub> laseru zahájen proces spékání prášku, který se ohřeje na teplotu tavení, aby došlo ke spojení jednotlivých částecек. Laser je řízen pomocí Softwaru, který upravuje intenzitu tak, aby došlo ke správnému natavení. Poté, co laser zhotoví jednu vrstvu, stůl se posune dolů (o výšku jedné vrstvy), dojde k nanесení vrstvy prášku a proces se opakuje. Nespečený prášek slouží jako podpora při tvorbě modelu [1, 18, 19].

Po zhotovení je nutné nechat výsledný model pomalu zchladnout. Po vychladnutí je možné model vyjmout. Na modelu jsou provedeny dokončovací operace (odstranění podpor, broušení a leštění). Tato technologie je vhodná pro výrobu modelů z keramiky, kovu, pryže a plastu [1, 18, 19].

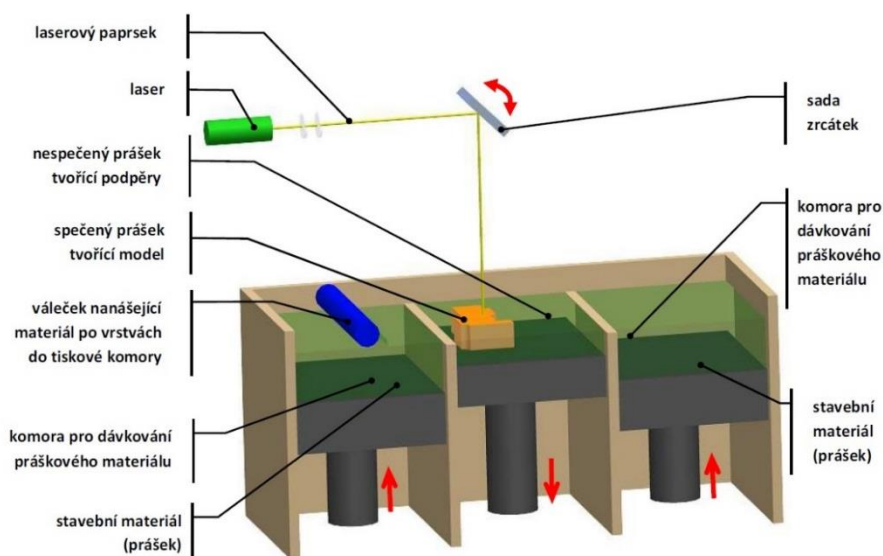
Použití technologie SLS je především pro výrobu prototypových forem a forem pro malosériovou výrobu. Výhoda při použití této technologie spočívá ve výrobě tvarově (konvekčními metodami téměř nevyrobitelných) složitých kanálků pro odvod tepla [1, 18, 20].

#### Výhody:

- pevnost součásti,
- funkční prototypy,
- tvorba součásti bez podpor,
- velká škála druhu použitelných materiálů [1, 18, 19].

#### Nevýhody:

- energetická náročnost,
- nízká kvalita povrchu je dána velikostí částecек práškového materiálu [1, 18, 19].



Obr. 2.4 Princip technologie SLS [24].

### 2.3.2 Technologie Direct Metal Laser Sintering

Technologie Direct Metal Laser Sintering zkráceně DMLS je obdobou technologie SLS (viz kapitola 2.3.1). Při technologii DMLS je použit jemný kovový prášek. Tavení tohoto prášku je prováděno s pomocí laseru vrstvu po vrstvě jako u technologie SLS, až je výrobek zhotoven [1, 18, 19].

Součástku zhotovenou technologií DMLS lze po dokončení brousit, leštit, tryskat nebo obrábět. Použití této technologie je pro výrobu forem nebo tvarově složitých součástí motoru [1, 18, 19].

Výhody:

- pevnost součásti,
- funkční prototypy,
- tvorba součásti bez podpor [1, 18, 19].

Nevýhody:

- energetická náročnost,
- nízká kvalita povrchu je dána velikostí částic práškového materiálu [1, 18, 19].

## 2.4 Shrnutí popisovaných metod

Jednotlivé technologie 3D tisku mají specifické vlastnosti (viz kapitoly 2.1 až 2.3). Vlastnosti souvisejí s principem jednotlivých metod a materiálů používaných pro dané technologie (viz tab. 2.1) [1, 18, 19].

Tab. 2.1 Přehled vybraných technologií 3D tisku [1, 18, 19].

Technologie	Materiál
LOM (Laminated Object manufacturing)	Papír, fólie
FDM (Fused Deposition Modeling)	ABS, polykarbonát, vosk
MJM (Multi Jet Modeling)	Termoplasty, akrylátový fotopolymer
SLA (StereoLitography Apparatus)	Fotopolymer
SGC (Solid Ground cutting)	Fotopolymer, nylon
SLS (Selective Laser Sintering)	Polyamid, nylon, vosk, kovové prášky
DMLS (Direct Metal Laser Sintering)	Kovové prášky



### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – PROVEDENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK.

Tato část bude zaměřena na zhotovení zkušebních vzorků a provedení mechanických zkoušek.

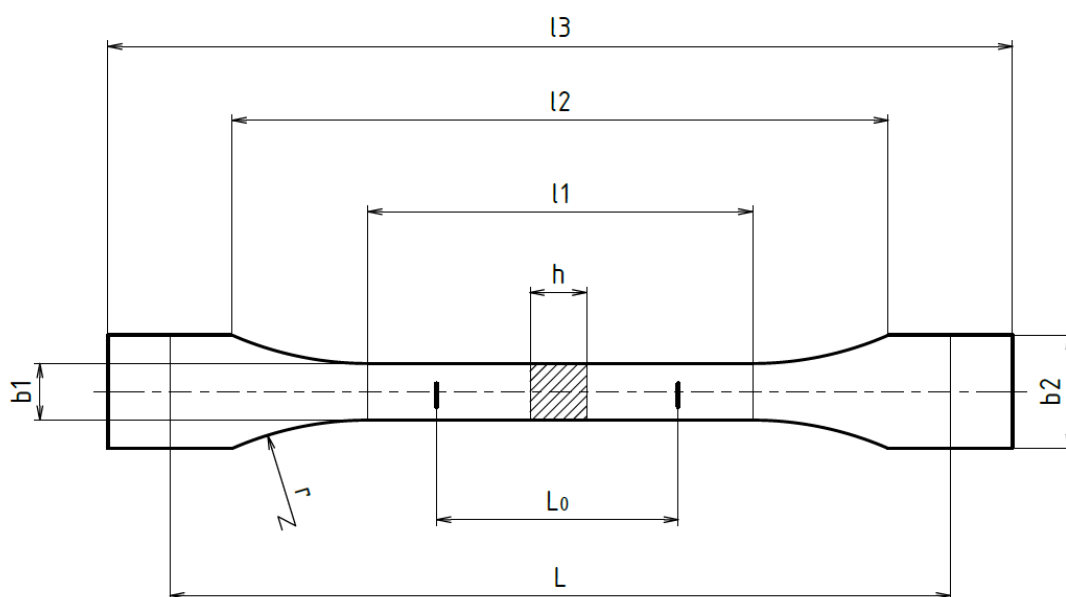
#### 3.1 Zkouška tahem materiálů zhotovených technologií 3D tisku

V této kapitole bude rozebrán detailní popis praktického provedení tahové zkoušky a zhotovení zkušebních vzorků pomocí 3D tiskárny. Pro zkoušku tahem byly použity materiály (ABS, PLA, nylon, SG 2000, S G145 a SG 2000 + Al pojivo).

##### 3.1.1 Výběr typu zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku

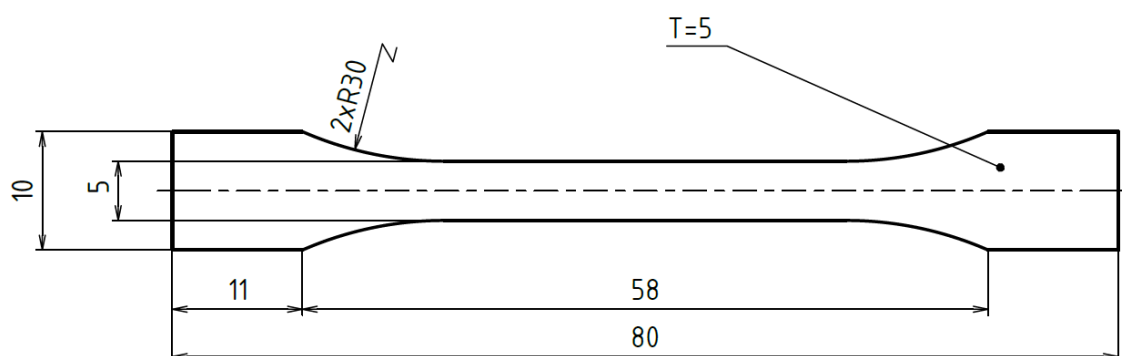
Tvary a rozměry (viz tab. 3.1) zkušebního vzorku byly stanoveny dle normy EN ISO 527-2:2012. Tato norma stanovuje podmínky pro zkoušení plastových materiálů a stanovení jejich tahových vlastností. Norma EN ISO 527-2:2012 nahradila českou normu ČSN EN ISO 527-2 z roku 1996. Norma EN ISO 527-2:2012 je předepsána pro zkoušení vzorků zhotovených vstřikováním, lisováním, vytlačováním a odléváním. Protože neexistuje norma pro tahové vzorky zhotovené aditivní technologií, byla použita tato norma.

Pro tahovou zkoušku byl vybrán zkušební vzorek typu 1BA (viz obr. 3.1). Norma stanovuje, že pokud není z jakýchkoliv důvodů možné použít standartní zkušební tělesa typu 1A a 1B, lze použít zmenšené vzorky typu 1BA, 1BB, 5A nebo 5B. Hlavním důvodem výběru tohoto vzorku byla úspora materiálu a s tím i související cena jednoho vzorku. Dalším důvodem byla úspora času potřebného na zhotovení jednotlivých vzorků [25, 26].



Obr. 3.1 Zkušební vzorek typ 1BA [25].

Parametry [mm]	Název	Rozměry [mm]
$l_3$	Celková délka	$\geq 75$
$l_2$	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	$58 \mp 2$
$l_1$	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \mp 0,5$
r	Poloměr	$\geq 30$
$b_2$	Šířka konců	$10,0 \mp 0,5$
$b_1$	Šířka zúžené části	$5,0 \mp 0,5$
$L_0$	Počáteční měřená délka	$25,0 \mp 0,5$
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_{20}^{+2}$
h	Tloušťka	$\geq 2$



Obr. 3.2 Schématické znázornění zkušebního vzorku

### 3.1.3 Zhotovení zkušebních vzorků

Z důvodu zlepšení statistického vyhodnocování bylo zhotoveno od každého typu materiálu (ABS s rokem výroby 2013, ABS s rokem výroby 2018, PLA, nylon) 30 ks vzorků. U materiálů ABS a nylonu se těchto 30 vzorků rozdělilo na dvě skupiny (horizontální tisk a vertikální tisk). Celkem tedy vzniklo 7 skupin (viz tab. 3.2).

Tab. 3.2 Skupiny vyhodnocených vzorků.

Skupina	Počet vzorků
PLA	30
ABS horizontální tisk 2013	15
ABS vertikální tisk 2013	15
ABS horizontální tisk 2018	15
ABS vertikální tisk 2018	15
Nylon horizontální tisk	15
Nylon vertikální tisk	15

**Vzorky z ABS** (viz obr. 3.4) byly zhotoveny na 3D tiskárně uPrint 3D od firmy Stratasys. Tato 3D tiskárna vytváří modely technologií FDM (viz kap. 2.1.2). Tiskárna je vybavena dvěma tryskami, přičemž hlavní tryska zajišťuje dávkování hlavního stavebního materiálu a druhá slouží ke tvorbě podpor.

Jak již bylo zmíněno výše, materiál ABS byl tisknut dvěma způsoby - horizontální tisk a vertikální tisk. Hlavním důvodem, proč byly vzorky tisknuty horizontálně nebo vertikálně, bylo zjištění pevnostních charakteristik při různém uspořádání vrstev vůči směru zatížení. Vzorky, tisknuté vertikálně (viz obr. 3.3) mají vlákna kolmo ke směru zatěžující síly a horizontální vzorky (viz obr. 3.3) mají vlákna rovnoběžná ke směru zatěžující síly.

**Vzorky z PLA** (viz obr. 3.5) byly vyrobeny na hobby tiskárně RepRap. Hlavní předností tiskáren RepRap je jejich pořizovací cena, další výhodou je jejich jednoduchá konstrukce. Nevýhoda těchto tiskáren je v rozměrové přesnosti modelu.



Horizontální tisk

Vertikální tisk

Obr. 3.3 Znázornění vzorku tisknutých vertikálně a horizontálně.



Obr. 3.4 Vzorky z ABS.



Obr. 3.5 Vzorky z PLA.



Obr. 3.6 Vzorky z nylonu.

### 3.1.4 Provedení tahové zkoušky

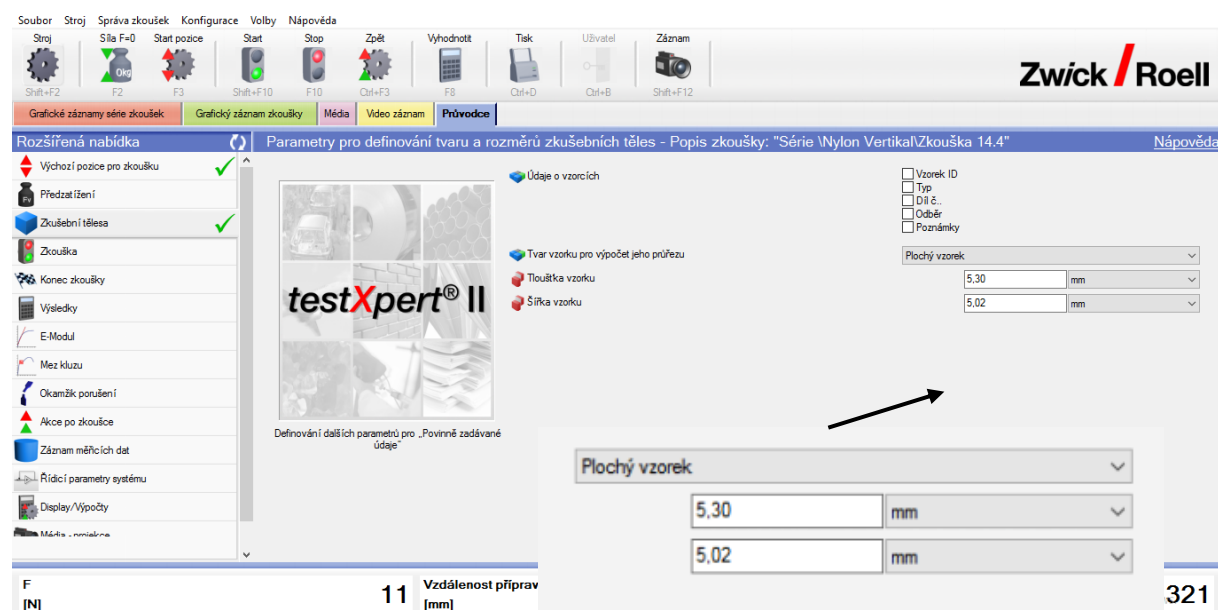
Tahová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Zwick Z100 (viz obr. 3.7). Toto zařízení umožňuje testování vzorků až do hodnoty 100 kN. Zkušební zařízení je přes datový kabel připojeno k počítači, který je opatřen programem testXpert od firmy Zwick. Pomocí tohoto programu dochází k nastavení vstupních parametrů zkoušky jako rychlost zatěžování, předzatížení, výchozí rozměry vzorku a počáteční vzdálenost upínacích čelistí. Tento program také slouží k vyhodnocení průběhu zkoušky a jednotlivých parametrů jako: meze pevnosti, tažnosti, meze kluzu, modulu pružnosti a další.



Obr. 3.7 Zkušební zařízení Zwick Z100.

V programu testXpert (viz obr. 3.8) od firmy Zwick byly na začátku experimentu nastaveny vstupní údaje dle normy EN ISO 527-1:2012. Vzdálenost upínacích čelistí byla nastavena na hodnotu 60 mm (viz tab. 3.1) a také byla zadána počáteční tloušťka a šířka zúžené části (viz obr 3.2). Tyto rozměry byly u každého vzorku odlišné (viz tab. 3.3), proto u každého vzorku byly před upnutím do čelistí zkušebního zařízení přeměřeny (tloušťka a šířka zúžené části) pomocí digitálního posuvného měřidla a zadány do programu testXpert (viz obr 3.8).

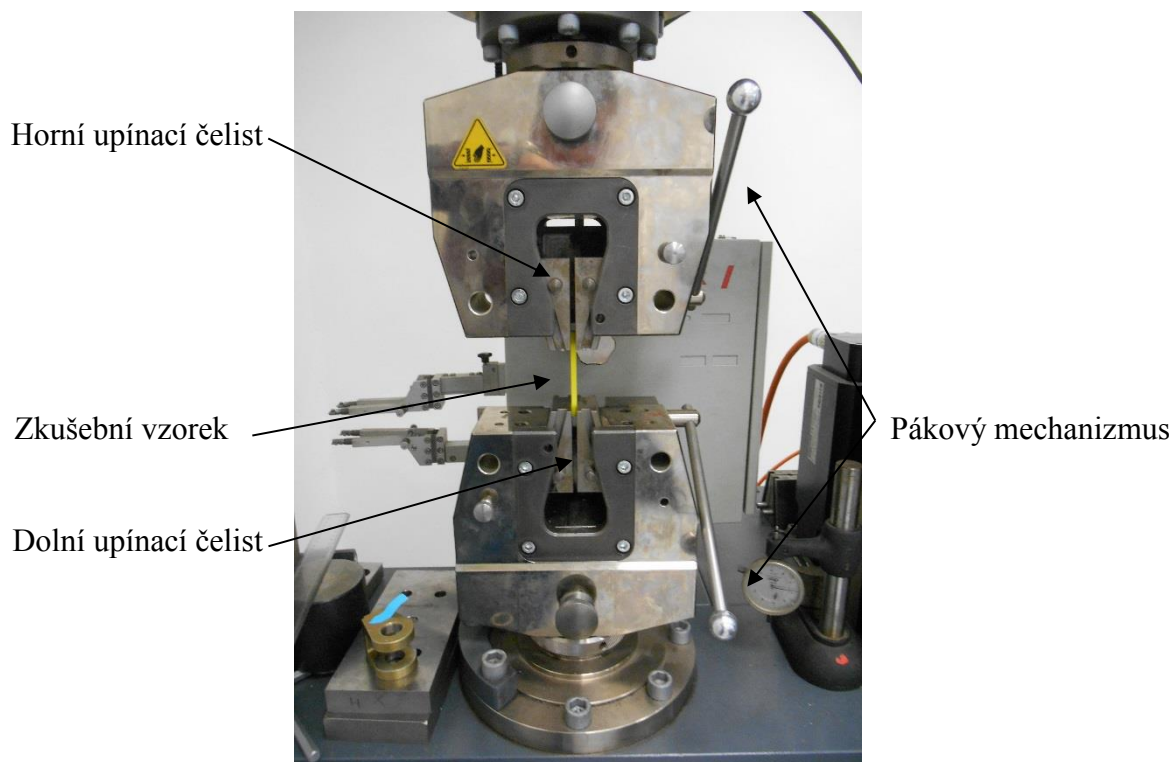


Obr. 3.8 Záložka *Průvodce* v programu testXpert.

Tab. 3.3 Intervaly vstupních rozměrů.

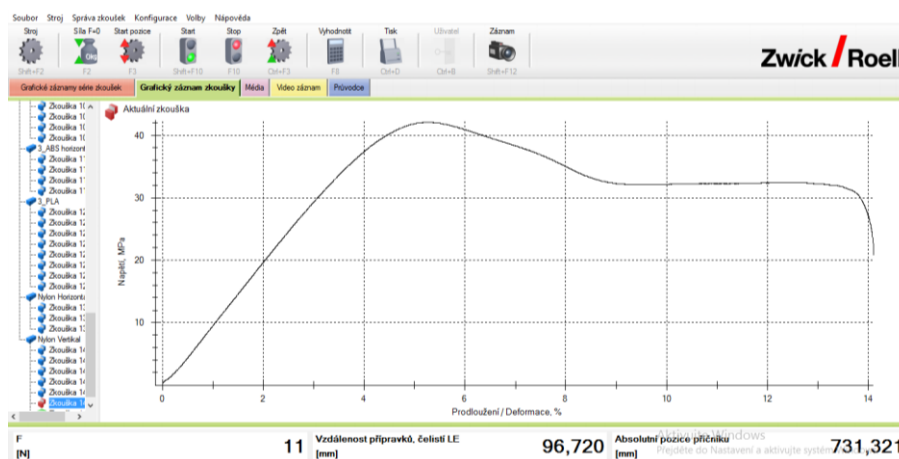
Materiál	Tloušťka [mm] (interval hodnot)	Šířka zúžené části [mm] (interval hodnot)
Nylon horizontální tisk	< 5,26; 5,32 >	< 5,00; 5,08 >
Nylon vertikální tisk	< 5,01; 5,20 >	< 5,24; 5,28 >
ABS horizontální tisk	< 5,20; 5,32 >	< 4,94; 4,99 >
ABS vertikální tisk	< 5,13; 5,55 >	< 4,95; 5,2 >
PLA	< 4,95; 5,16 >	< 5,11; 5,38 >

Po nastavení průběhu zkoušky v programu testXpert byl do zkušebního zařízení vložen zkušební vzorek. Jednotlivé vzorky byly popsány čísly, aby bylo zajištěno, že i po skončení zkoušky půjde rozpoznat, které dvě části vzorku patří k sobě. Při upínání vzorků do čelistí zkušebního zařízení bylo zajištěno, že podélná osa zkušebního vzorku je totožná s osou zkušebního zařízení. Samotné upínání je provedeno tak, že nejprve se vzorek vloží mezi spodní čelisti (viz obr. 3.9) a pomocí pákového mechanismu (viz obr. 3.9) dojde k přitlačení čelistí na povrch vzorku. Následně je provedena kontrola rovnoběžnosti. Poté dojde k přitlačení horní upínací čelisti (viz obr. 3.9). Upínací síla musí být taková, aby nedošlo k vyklouznutí vzorku z čelistí v průběhu zkoušky, ale zároveň nesmí dojít k rozdrčení zkušebního vzorku. Z tohoto důvodu je na čelistech zhotoven drsný povrch, který zvyšuje hodnotu tření a zabraňuje vyklouznutí vzorku.



Obr. 3.9 Upínací část zkušebního zařízení.

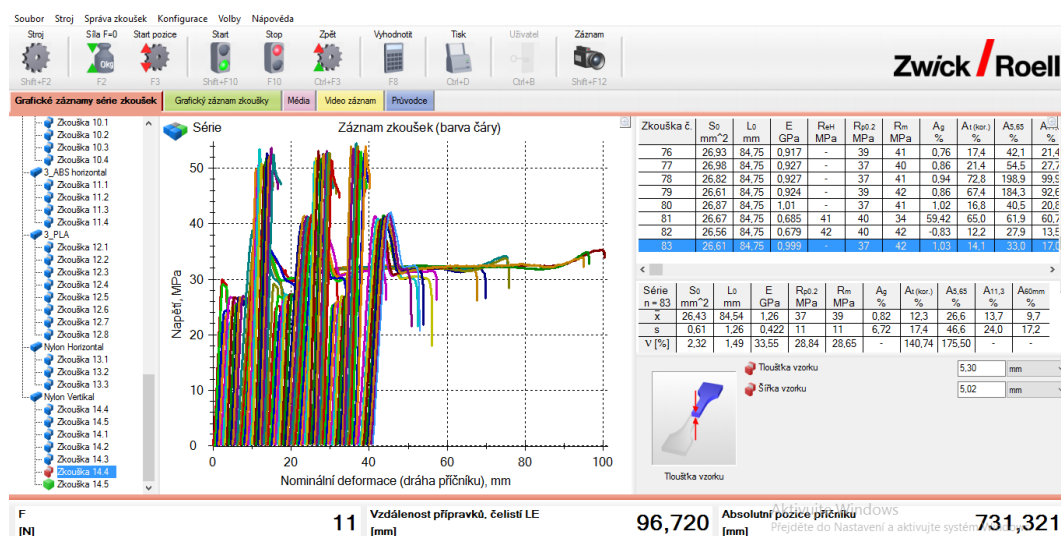
Po konečné kontrole, zda je vzorek upnut správně, je pomocí programu testXpert zahájena zkouška. V průběhu zkoušky program testXpert zobrazuje grafickou závislost napětí na deformaci, vzdálenost čelistí a působící sílu (viz obr. 3.10).



Obr. 3.10 Grafický záznam zkoušky.

Zkouška je automaticky ukončena v okamžiku přetržení vzorku. Program testXpert vyhodnotí požadované parametry a zobrazí výsledky (viz obr. 3.11). Každý vzorek má přidělené číslo zkoušky ve své skupině pojmenované dle typu materiálu.

Proces se opakuje až do změření všech typů vzorků. Po dokončení zkoušky jsou jednotlivá data exportována do excelu, kde je možné dále data zpracovávat.



Obr. 3.11 Zobrazení výsledků zkoušky.

### 3.2 Zkouška tahem materiálů zhotovených metodou Soft Tooling

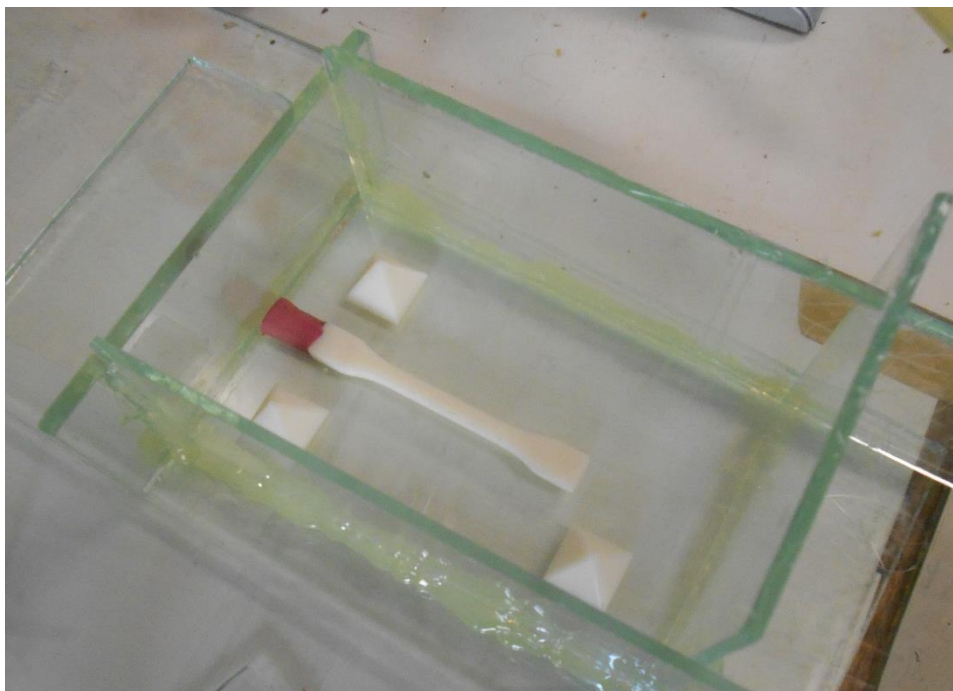
Metoda Soft Tooling, jak vyplývá z názvu, používá pro výrobu modelů měkké materiály např. silikon.

#### 3.2.1 Výroba silikonové formy

Princip této metody spočívá ve výrobě silikonové formy, která následně slouží k výrobě vzorků. Pro zhotovení formy je nejprve nutné zhotovit model, který bude sloužit jako vzor při výrobě formy. Výroba vzorku pro výrobu formy se může provádět několika způsoby od konvekčních metod až po nekonvekční metody. Mezi nejvhodnější a nejrychlejší způsoby výroby vzorku pro tvorbu formy patří technologie 3D tisku. V tomto případě byla použita technologie FDM (viz kap. 2.2.1). U zhotoveného vzorku je nutné provést zabroušení povrchu, čímž dojde k vyrovnaní nerovností na povrchu vzorku. Toto je nutné provést s ohledem na kvalitu výsledné formy.

Připravený vzorek se položí na očištěnou a odmaštěnou skleněnou podložku (viz obr. 3.12). Společně se vzorkem se na podložku umístí pyramidy (viz obr. 3.12), které zajišťují následné přesné spojení obou dílů formy. Pyramidy a vzorek se tenkou vrstvou lepidla přilepí ke sklu. Přilepením se zabrání posuvu při nalévání silikonu. Dalším krokem je zhotovení vtokového kanálku. Kanálek byl v tomto případě zhotoven z plastelíny a byl umístěn v horní upínací části vzorku. Hlavním důvodem, že vtokový kanálek byl takto umístěn, byla snaha o co nejmenší ovlivnění zkušební oblasti na vzorku (zúžená část vzorku). Poté, co jsou provedeny předešlé úkony, jsou zhotoveny okraje formy. Tyto okraje jsou tvořeny skleněnými deskami přilepenými k sobě (viz obr. 3.12) tavnou pistolí.





Obr. 3.12 Výroba silikonové formy.

Dalším krokem při výrobě formy je příprava formovacího materiálu (v tomto případě byl použit materiál silikon RTV-4234-T4 Base). Objem připraveného materiálu se určí z objemu skleněné formy. Objem se přepočítá na hmotnost (pro výrobu první poloviny formy bylo použito 360 g materiálu). Tento objem byl přesně rozdělen do tří odměrek. Pro odměření přesného množství do jednotlivých odměrek byly použity digitální váhy. Do každé odměrky byl aplikován roztok, který zajišťuje vytvrzení silikonu. Směs se musí důkladně promíchat, aby došlo k promísení tvrdidla a silikonu. Odměrky se vloží do vakuové komory (viz obr. 3.13).



Obr. 3.13 Vakuová komora.

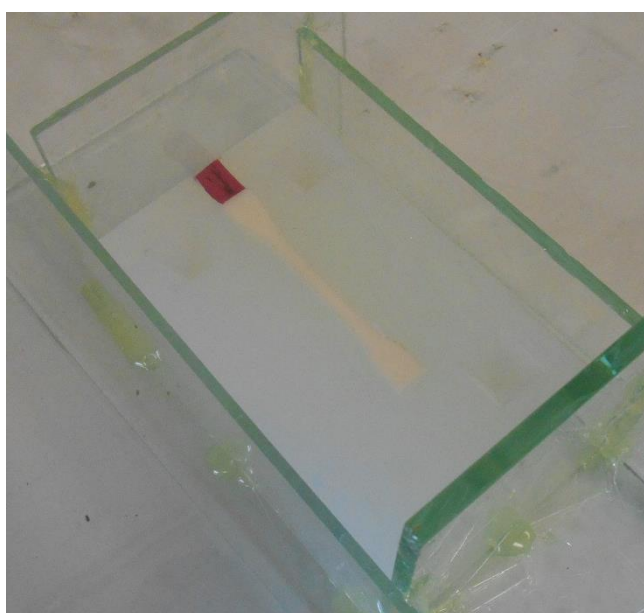
Vakuová komora je schopná vytvořit vakuum o podtlaku až 1 bar. Cílem vložení formovacího materiálu do vakuové komory je odstranění bublin. Při vzrůstající hodnotě podtlaku dochází ke zvětšování objemu materiálu v odměrkách (viz obr. 3.14). V materiálu dochází k zániku tlakových bublin a vzniku podtlakových (podtlakové bubliny jsou žádoucí, protože při zvýšení na atmosférický tlak dojde k jejich zániku). Tento proces se opakuje nejméně třikrát, čímž se zaručí, že formovací materiál nebude obsahovat póry.



Obr. 3.14 Průběh vakuování formovací hmoty.

Vyvakuovaný formovací materiál se vyjme z vakuové komory (nesmí se promíchat, došlo by ke tvorbě bublin) a opatrně se nalije do připravené formy (viz obr. 3.12). Toto se provede u všech tří odměrek. Tímto způsobem je zhotovena první část silikonové formy.

Silikon je nutné nechat jeden den vytvrdnout. Poté lze opatrně odstranit skleněné desky, jak z boku, tak ze dna formy, a také se může vyjmout zkušební vzorek a pyramidy a očistí se od případných přelitek. Je nutné po očištění vložit vzorek společně s vtokem do formy zpět, jinak by došlo k zalití dutiny. Vytvrzená polovina formy se otočí dělicí rovinou vzhůru (viz obr 3.15).



Obr. 3.15 Výroba druhé poloviny formy.

Dělicí rovina se natře speciálním roztokem, který zaručí snazší oddělení obou polovin formy. Následný proces je stejný jako u výroby první poloviny formy. První silikonová forma se obloží skleněnými deskami a slepí se tavnou pistolí (viz obr 3.15), následně se stejným postupem připraví formovací hmota (naváže, promíchá a zbaví bublin ve vakuové komoře) a nalije se na první polovinu formy. Výsledná forma se nechá jeden den zatvrdnout. Po zatvrdnutí se odstraní skleněné desky, forma se očistí a je připravena k použití (viz obr. 3.16).



Obr. 3.16 Silikonová forma.

### 3.2.2 Výroba zkušebních vzorků metodou Soft Tooling

Pro výrobu zkušebních vzorků byly vybrány tyto materiály SG 2000, SG 2000 + hliníkové pojivo F – ALU a SG 145 (viz obr. 3.17 až 3.19). Tyto materiály jsou speciální pryskyřice určené pro slévárství.

Postup výroby je u materiálů SG 2000 (viz obr. 3.17) a SG 145 (viz obr. 3.18) velmi podobný. Materiály jsou dodávány ve dvou vzájemně oddělených složkách (složka A a složka B). Složka A je pryskyřice a složka B je tužidlo, které zajišťuje vytvrzení pryskyřice. Poměr složek je 1:1, materiály se přesně odměří (digitální váhy, injekční stříkačka) a důkladně promíchají. Po důkladném promíchání se roztok vlije do silikonové formy. Hmota se nechá vytvrdnout přibližně 30 min. Následně se zhotovený vzorek opatrně vyjme z formy a postup se opakuje.

Materiál SG 2000 + hliníkové pojivo F – ALU (viz obr. 3.19), jehož základem je pryskyřice SG 2000. Tento materiál se liší od SG 2000 tím, že je do něho přidáno hliníkové pojivo ve formě prášku. Toto pojivo zajišťuje zlepšení teplotní odolnosti materiálů SG 2000. Teplotní odolnost SG 2000 bez hliníkového pojiva je 60 až 70 °C, při přidání hliníkového pojiva vzroste teplotní odolnost na 90 až 100 °C. Poměr jednotlivých složek je 1:1:3 (složka A: složka B: Hliníkové pojivo). Složky je nutné důkladně promíchat, aby došlo



k promísení pojiva. Následně se roztok nalije do formy a nechá vytvrdnout (30 min). Po vytvrzení se opatrně vyjme z formy.



Obr. 3.17 Vzorky z SG 2000.



Obr. 3.18 Vzorky z SG 145.



Obr. 3.19 Vzorky z SG 2000 + hliníkové pojivo F – ALU.

Všechny vzorky zhotovené technologií Soft Tooling je nutné po odlití upravit (odstranit vtok). Odstranění vtoku se provádí například pomocí ruční pily. Po odříznutí vtoku je plocha zarovnána pilníkem do roviny.

Od každého materiálu bylo zhotoveno 15 ks vzorků (viz tab. 3.4).

Tab. 3.4 Skupiny vyhodnocených vzorků.

Skupina	Počet vzorků
SG 2000	15
SG 145	15
SG 2000 + hliníkové pojivo F – ALU	15

### 3.2.3 Provedení tahové zkoušky

Vzorky zhotovené metodou Soft Tooling byly zkoušeny stejným způsobem jako vzorky vyrobené technologií 3D tisku (viz kap. 3.1.4). Princip zkoušky byl totožný jako při zkoušení vzorků zhotovených 3D tiskem.

### 3.3 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti byla provedena pro tyto typy materiálů: ABS, PLA, nylon, SG 2000, SG 145, SG 2000 + AL. Pro měření tvrdosti byla použita metoda Shore D. Tato metoda umožňuje měření tvrdosti v rozsahu od 10 do 90 jednotek.

Pro zkoušku tvrdosti byly připraveny válcové vzorky o průměru 40 mm a výšce 10 mm (viz obr. 3.20). Pro každý materiál byly připraveny dva vzorky. Velikost vzorku byla zvolena s ohledem na normu EN ISO 7619. Při měření byly dodrženy minimální hodnoty vzdálenosti mezi jednotlivými vtisky a vzdálenosti od kraje vzorku. Pro každý materiál bylo stanoveno celkem 16 hodnot tvrdosti (16 hodnot bylo rozděleno mezi dva vzorky 8 a 8).



Obr. 3.20 Zkušební vzorky pro měření tvrdosti.

Měření probíhalo na tvrdoměru od firmy Digi Tech (viz obr. 3.21). Princip měření spočívá ve vtlačení indentoru (tvar kužele) po dobu 15 sekund. Následně je z displeje (viz obr. 3.21) odečtena hodnota tvrdosti.



3.21 Zařízení pro měření tvrdosti.

### 3.4 Stanovení drsnosti povrchu

Drsnost povrchu byla vyhodnocována pro materiály zhotovené technologií 3D tisku. Pro měření drsnosti byly zhotoveny vzorky stejného tvaru jako pro měření tvrdosti (viz obr. 3.20). Snímky povrchu zkušebních vzorků byly pořízeny na dílenském měřicím mikroskopu OLYMPUS MVX10.

Prostorové měření a hodnocení profilu povrchu bylo provedeno přístrojem Talysurf CLI 1000 (viz obr. 3.20). Pro analyzované povrchy byl zvolen dotykový způsob měření.



Obr. 3.22 Zařízení pro vyhodnocení profilu povrchu Talysurf CLI 1000.

#### 4 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Tato část se bude zabývat zhodnocením dosažených výsledků z jednotlivých mechanických zkoušek. Budou zde srovnány experimentálně získané hodnoty parametrů s hodnotami, které udává výrobce. Mezi vyhodnocené parametry patří mez pevnosti, modul pružnosti v tahu, tažnost, drsnost povrchu a tvrdost.

Pro vyhodnocování naměřených veličin bylo zvoleno normální rozdělení. Normální rozdělení bylo použito na základě konzultace s doc. RNDr. Zdeňkem Karpíškem, CSc. zabývajícím se oborem statistika a optimalizace, který provedl kontrolu dat na základě kritérií normálního rozdělení. Protože naměřená data vyhovovala kritériím normálního rozdělení, bylo použito pro tvorbu Gaussovy křivky a intervalu spolehlivosti (viz kap. 4.1).

Jednotlivé veličiny byly statisticky vyhodnoceny ve statistickém programu STATGRAPHICS, který umožňuje vyhodnocení naměřených dat pomocí normálního rozdělení.

Jednotlivé statistické parametry (aritmetický průměr, rozptyl, směrodatná odchylka, koeficient variace) hodnocené pro jednotlivé mechanické vlastnosti byly vypočteny dle vztahů (viz vztahy 4.0 až 4.4). Výpočet byl proveden pro všechny typy vzorků stejným způsobem.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.0)$$

$\bar{x}$ - aritmetický průměr,

n-počet prvků statistického souboru,

$x_i$ - prvek statistického souboru o indexu i,

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (4.1)$$

$s^2$ - rozptyl,

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.2)$$

s- směrodatná odchylka,

$$V = 100 \cdot \frac{s}{\bar{x}} [\%] \quad (4.3)$$

V-koeficient variace,

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

$s_{\bar{x}}$ - střední chyba průměru.

#### 4.1 Vyhodnocení výsledků u materiálu ABS

Vzorky z materiálu ABS byly rozděleny do čtyř skupin, které byly následně podrobeny tahové zkoušce. Protože při vyhodnocování by bylo obtížné pracovat s těmito názvy skupin, byly použity tzv. pracovní názvy (viz tab. 4.1). Podobný postup byl použit i pro vyhodnocené veličiny (viz tab. 4.2).

Protože u materiálu ABS hraje významnou roli stárnutí, bylo rozhodnuto, že mechanické vlastnosti materiálu budou určeny jak pro materiál z roku 2013 (kazeta s materiálem byla v takovém stavu v jakém ji dodává výrobce), tak pro materiál z roku 2018 (kazeta byla také ve stavu v jakém ji dodává výrobce).

Referenční hodnoty udávané výrobcem (viz obr. 4.0, 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12, 4.14, 4.16, 4.18, 4.20, 4.22) byly stanoveny dle materiálového listu (viz příloha 27).

Tab. 4.1 Vyhodnocované skupiny vzorků pro materiál ABS.

Skupina	Pracovní název
ABS horizontální tisk 2013	ABS_H_2013
ABS vertikální tisk 2013	ABS_V_2013
ABS horizontální tisk 2018	ABS_H_2018
ABS vertikální tisk 2018	ABS_V_2018

Tab. 4.2 Pracovní názvy vyhodnocovaných veličin u materiálu ABS.

Skupina	Měřená veličina	Pracovní název
ABS horizontální tisk 2013	Mez pevnosti v tahu	Rm_H_2013
	Tažnost (korelovaná)	At (kor.)_H_2013
	Modul pružnosti v tahu	E_H_2013
ABS vertikální tisk 2013	Mez pevnosti v tahu	Rm_V_2013
	Tažnost (korelovaná)	At (kor.)_V_2013
	Modul pružnosti v tahu	E_V_2013



Skupina	Měřená veličina	Pracovní název
ABS horizontální tisk 2018	Mez pevnosti v tahu	Rm_H_2018
	Tažnost (korelovaná)	At (kor.)_H_2018
	Modul pružnosti v tahu	E_H_2018
ABS vertikální tisk 2018	Mez pevnosti v tahu	Rm_V_2018
	Tažnost (korelovaná)	At (kor.)_V_2018
	Modul pružnosti v tahu	E_V_2018

#### 4.1.1 ABS horizontální tisk 2013

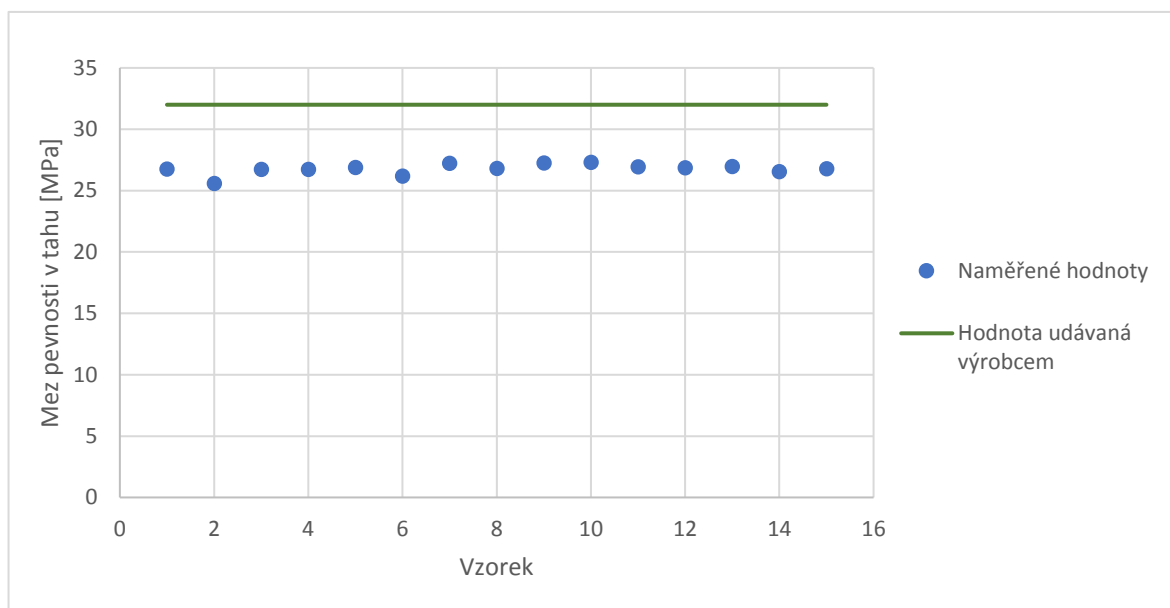
Pomocí programu STATGRAPHICS byly určeny základní statistické parametry pro jednotlivé měřené veličiny.

##### Mez pevnosti v tahu

Hodnota meze pevnosti udávaná výrobcem je 32 MPa. Z výsledku zkoušky byly určeny hodnoty jednotlivých parametrů (viz tab. 4.3), ze kterých je patrné, že hodnota udávaná výrobcem je vyšší než vyhodnocené parametry.

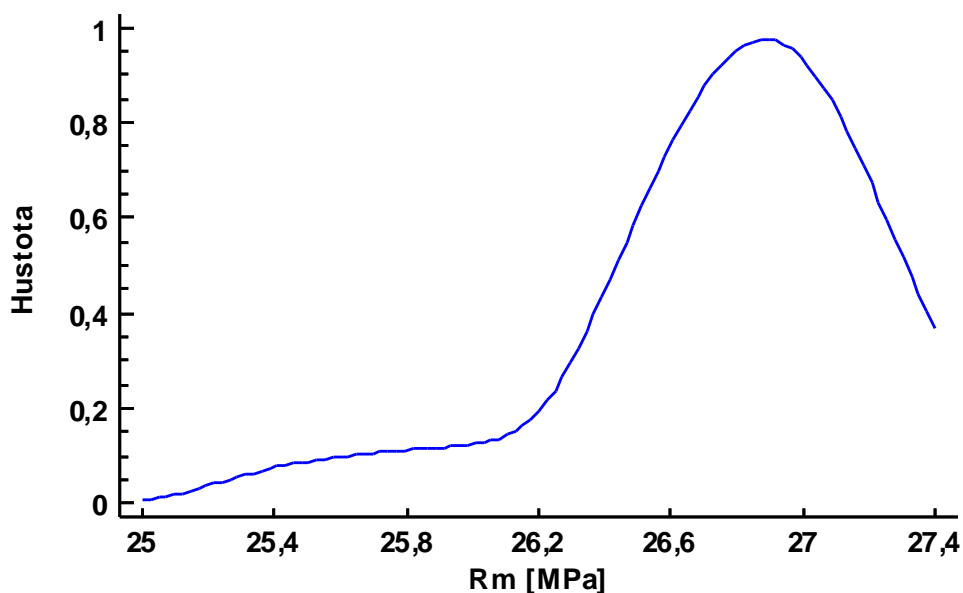
Tab. 4.3 Základní statistické parametry meze pevnosti v tahu.

Parametry	Hodnoty
Průměr	26,7819 MPa
Medián	26,8256 MPa
Rozptyl	0,1850
Směrodatná odchylka	0,4301
Variační koeficient	1,6059 %
Střední chyba průměru	0,1110
Minimální hodnota	25,6015 MPa
Maximální hodnota	27,3169 MPa



Obr. 4.0 Porovnání naměřených hodnot meze pevnosti v tahu s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.0) vyplývá, že hodnoty meze pevnosti nedosahují hodnot udávaných výrobcem. Z tohoto důvodu byl určen 95 % interval spolehlivosti [26,54; 27,02], ze které ho lze s pravděpodobností 95 % určit mez pevnosti v tahu.



Obr. 4.1 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro mez pevnosti v tahu.

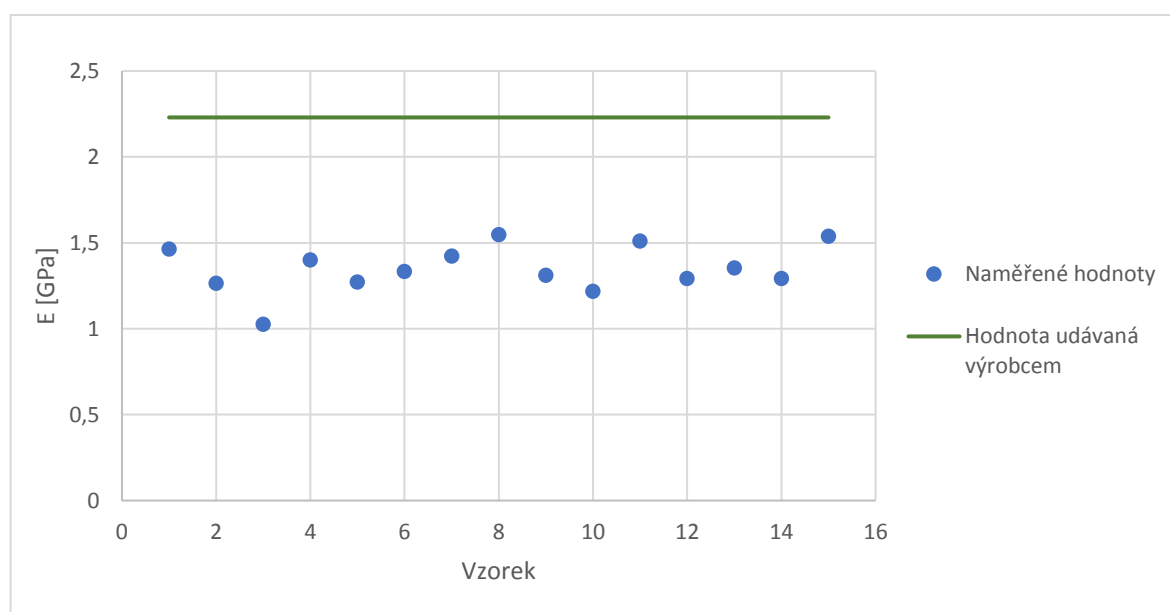
Z grafické závislosti (viz obr. 4.1) je patrné, že část hodnot vykazuje nesymetrii, tato nesymetrie může být způsobena skrytými vadami ve vnitřní části vzorku.

### Modul pružnosti v tahu

Postup statistického vyhodnocování naměřených dat je totožný jako u meze pevnosti. Tabulka (viz tab. 4.4) zobrazuje základní statistické parametry.

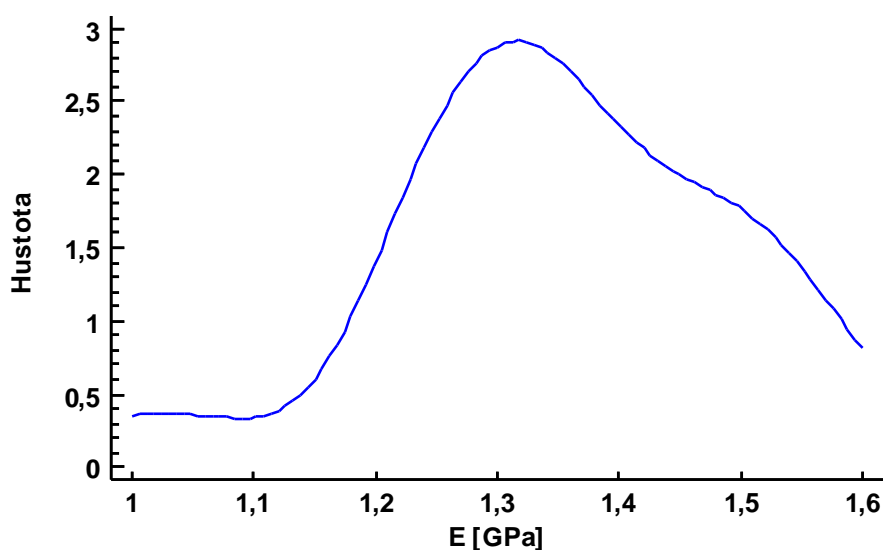
Tab. 4.4 Základní statistické parametry modulu pružnosti v tahu.

Parametry	Hodnoty
Průměr	1,3503 GPa
Medián	1,3336 GPa
Rozptyl	0,0189
Směrodatná odchylka	0,1376
Variační koeficient	10,1889 %
Střední chyba průměru	0,0355
Minimální hodnota	1,0259 GPa
Maximální hodnota	1,5478 GPa



Obr. 4.2 Porovnání naměřených hodnot modulu pružnosti s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.2) je patrné, že hodnoty modulu pružnosti jsou nižší než hodnoty udávané výrobcem. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot [1,27408; 1,42645].



Obr. 4.3 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro modul pružnosti v tahu.

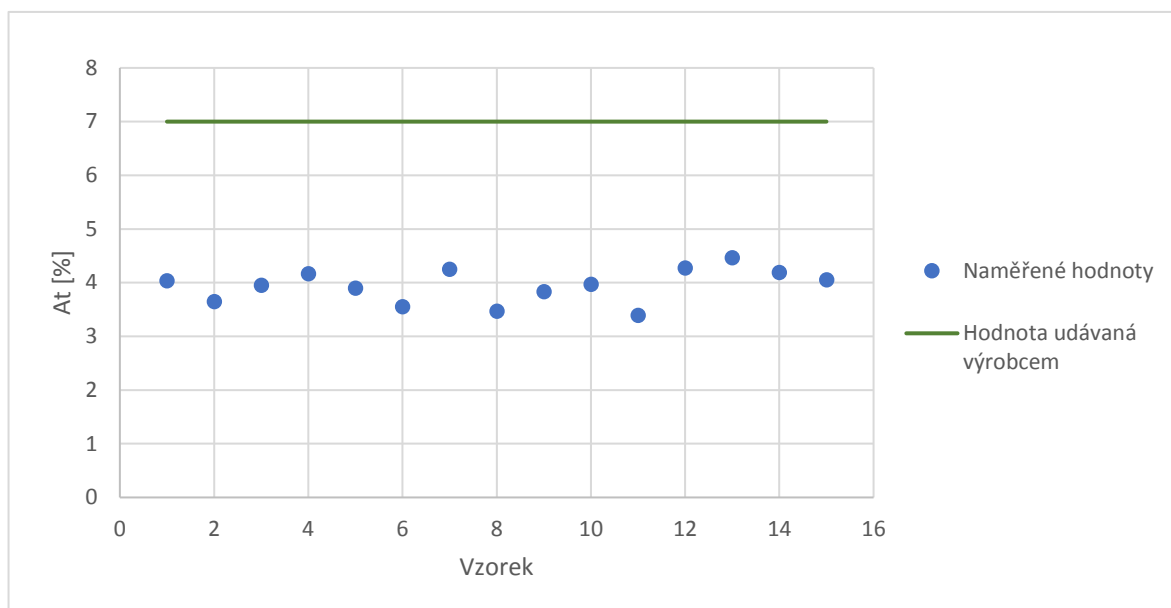
Z grafické závislosti (viz obr. 4.3) vyplývá, že nejvyšší hodnota hustoty normálního rozdělení je okolo hodnoty 1,3 GPa.

### Tažnost

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.5).

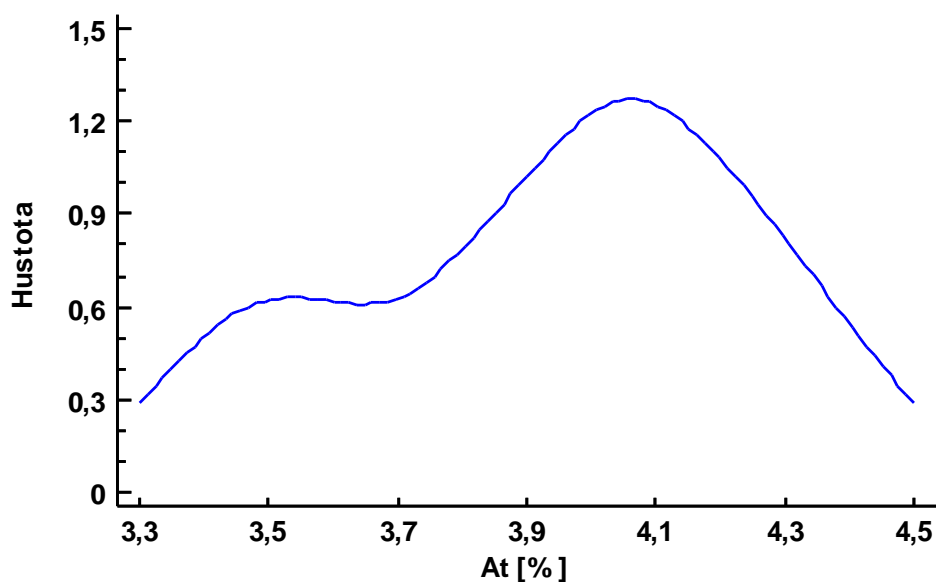
Tab. 4.5 Základní statistické parametry tažnosti.

Parametry	Hodnoty
Průměr	3,9454 %
Medián	3,9724 %
Rozptyl	0,0993
Směrodatná odchylka	0,3152
Variační koeficient	7,9886 %
Střední chyba průměru	0,0814
Minimální hodnota	3,3911 %
Maximální hodnota	4,4654 %



Obr. 4.4 Porovnání naměřených hodnot tažnosti s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.4) lze vidět, že hodnoty tažnosti nedosahují udávané hodnoty. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot **[3,77084; 4,11993]**.



Obr. 4.5 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro tažnost.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.5) je patrné, že během experimentu část vzorků vykázala nesymetrii. Tato nesymetrie může být způsobena vadou vzorku.

#### 4.1.2 ABS vertikální tisk 2013

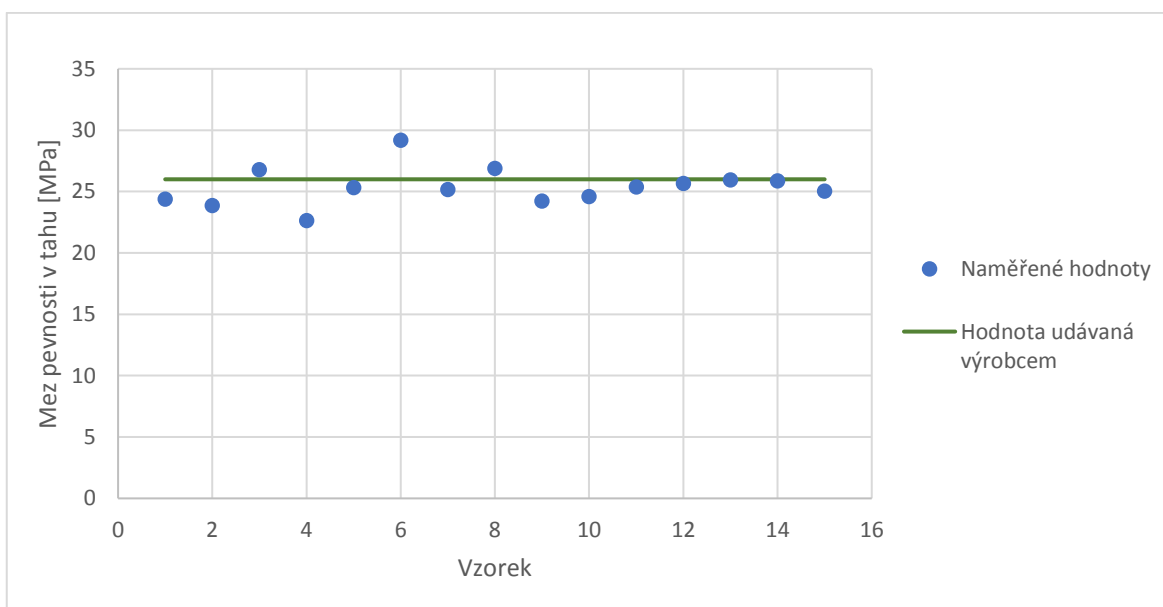
Princip vyhodnocování je totožný jako u ABS horizontální tisk 2013.

##### Mez pevnosti v tahu

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.6).

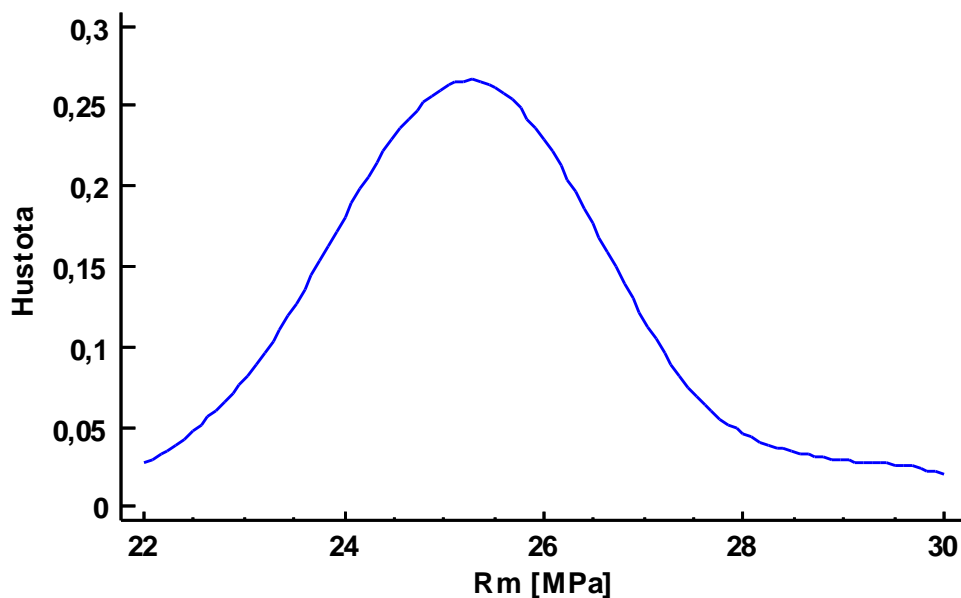
Tab. 4.6 Základní statistické parametry meze pevnosti v tahu.

Parametry	Hodnoty
Průměr	25,3974 MPa
Medián	25,3177 MPa
Rozptyl	2,3147
Směrodatná odchylka	1,5214
Variační koeficient	5,9904 %
Střední chyba průměru	0,3928
Minimální hodnota	22,6328 MPa
Maximální hodnota	29,1916 MPa



Obr. 4.6 Porovnání naměřených hodnot meze pevnosti v tahu s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.6) vyplývá, že hodnoty meze pevnosti dosahují hodnot udávaných výrobcem, ale velká část (12 hodnot) je pod touto hodnotou. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot [24,5549; 26,2399].



Obr. 4.7 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro mez pevnosti v tahu.

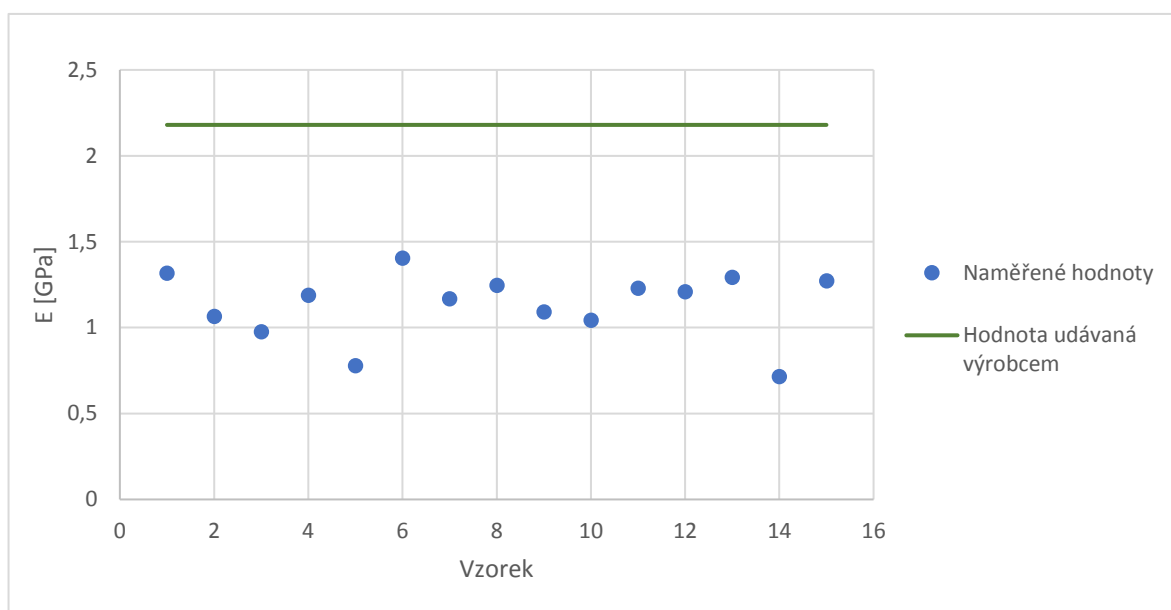
Z grafické závislosti (viz obr. 4.7) lze vyvodit, že nevyšší hodnota hustoty je 25 MPa.

### Modul pružnosti v tahu

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.7).

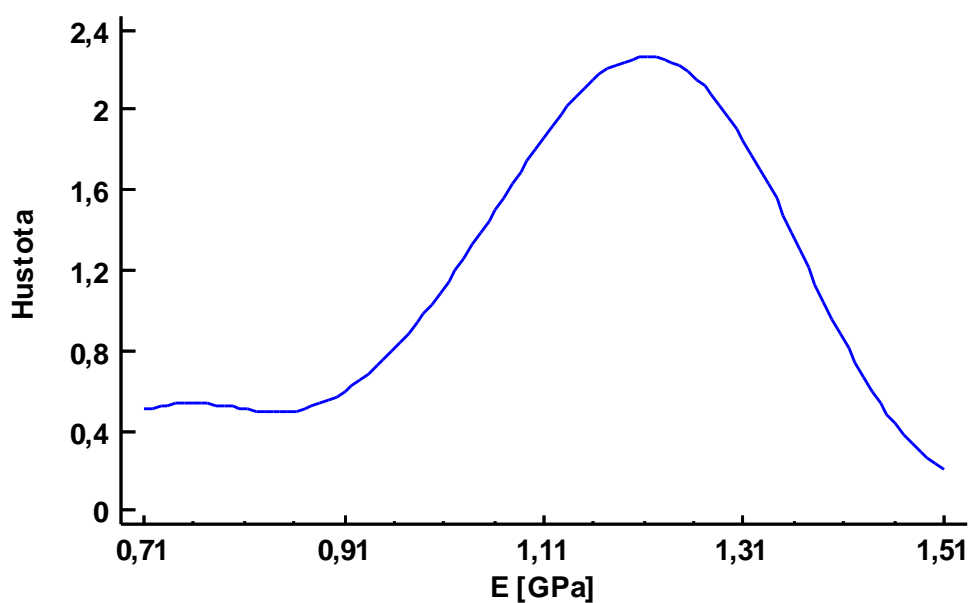
Tab. 4.7 Základní statistické parametry modulu pružnosti v tahu.

Parametry	Hodnoty
Průměr	1,1337 GPa
Medián	1,1885 GPa
Rozptyl	0,0374
Směrodatná odchylka	0,1934
Variační koeficient	17,0572 %
Střední chyba průměru	0,0499
Minimální hodnota	0,7159 GPa
Maximální hodnota	1,4061 GPa



Obr. 4.8 Porovnání naměřených hodnot modulu pružnosti s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.8) je patrné, že hodnoty modulu pružnosti jsou nižší než hodnoty udávané výrobcem. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot **[1,02662; 1,2408]**.



Obr. 4.9 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro modul pružnosti v tahu.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.3) vyplývá, že hodnoty hustoty normálního rozdělení jsou přibližně symetrické okolo hodnoty 1,2 GPa.

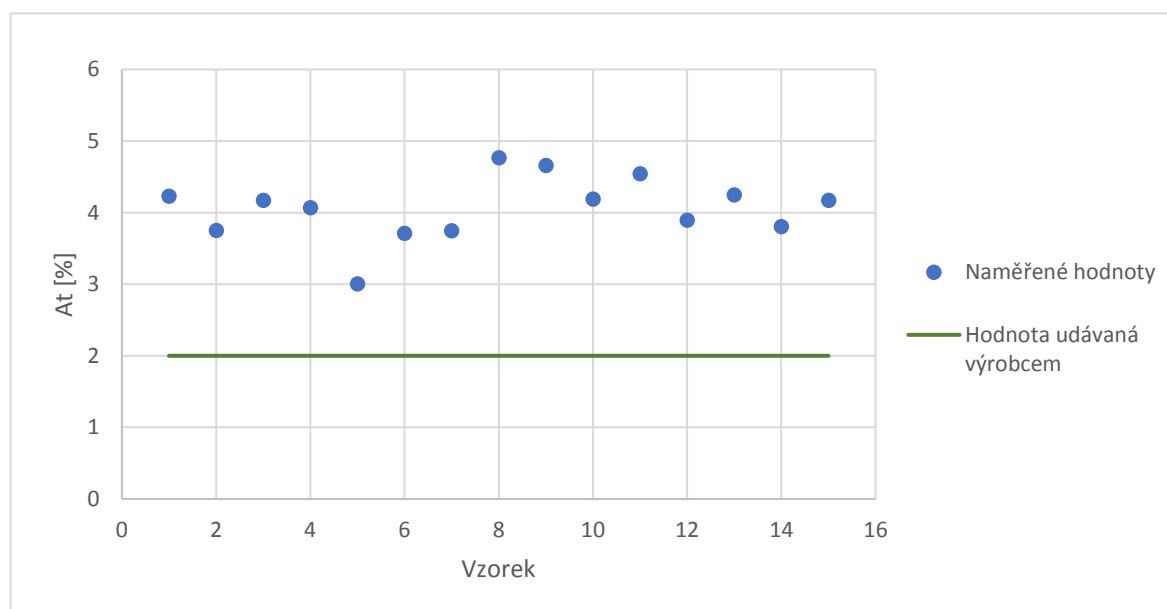


### Tažnost

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.8).

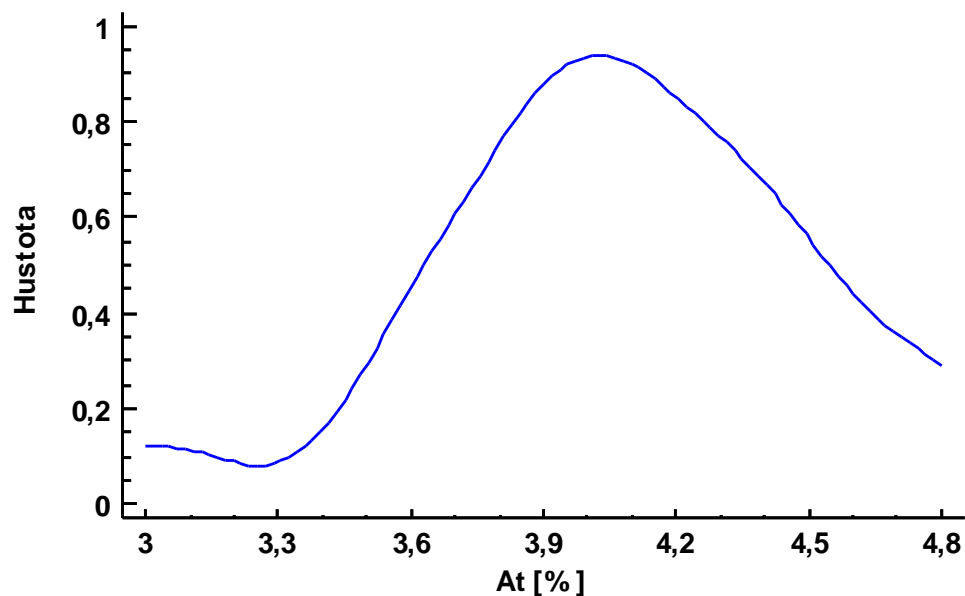
Tab. 4.8 Základní statistické parametry tažnosti.

Parametry	Hodnoty
Průměr	4,0646 %
Medián	4,1720 %
Rozptyl	0,1939
Směrodatná odchylka	0,4404
Variační koeficient	10,8344 %
Střední chyba průměru	0,1137
Minimální hodnota	3,0056 %
Maximální hodnota	4,7661 %



Obr. 4.10 Porovnání naměřených hodnot tažnosti s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.9) lze vidět, že hodnoty tažnosti převyšují udávané hodnoty. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot [3,82077; 4,30852].



Obr. 4.11 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro tažnost.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.5) je patrné, že během experimentu část vzorků vykazala nesymetrii. Tato nesymetrie může být způsobena vadou vzorku.

#### 4.1.3 ABS horizontální tisk 2018

Protože výsledky materiálu ABS 2013 nedosahovaly hodnot udávaných výrobcem bylo přistoupeno k vyhodnocení materiálu z roku 2018 (ABS 2018).

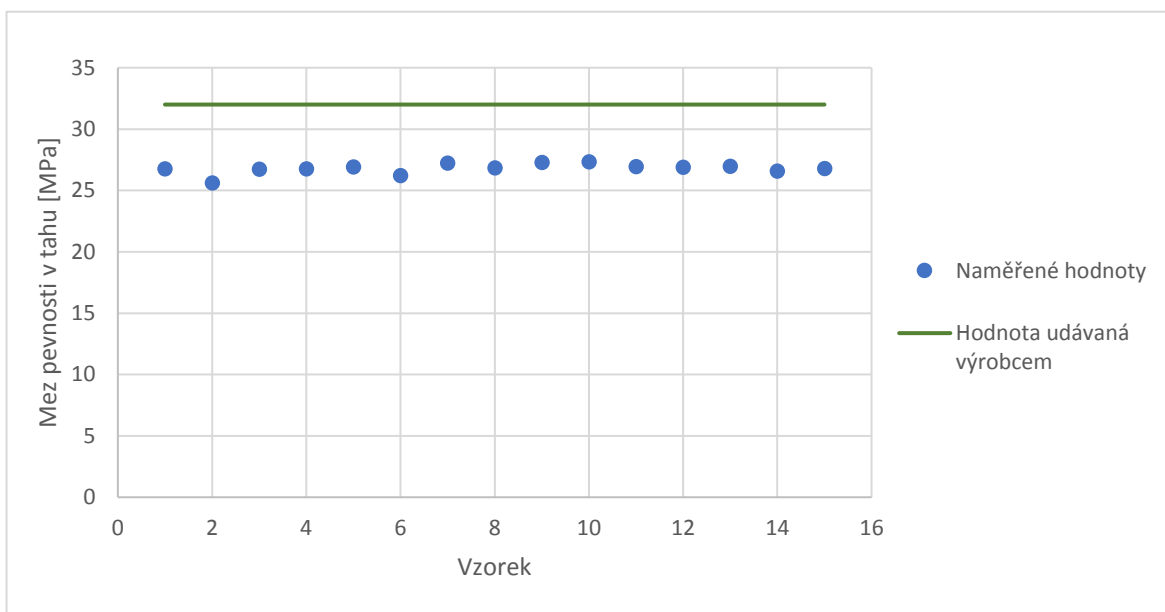
#### Mez pevnosti v tahu

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.9)

Tab. 4.9 Základní statistické parametry meze pevnosti v tahu.

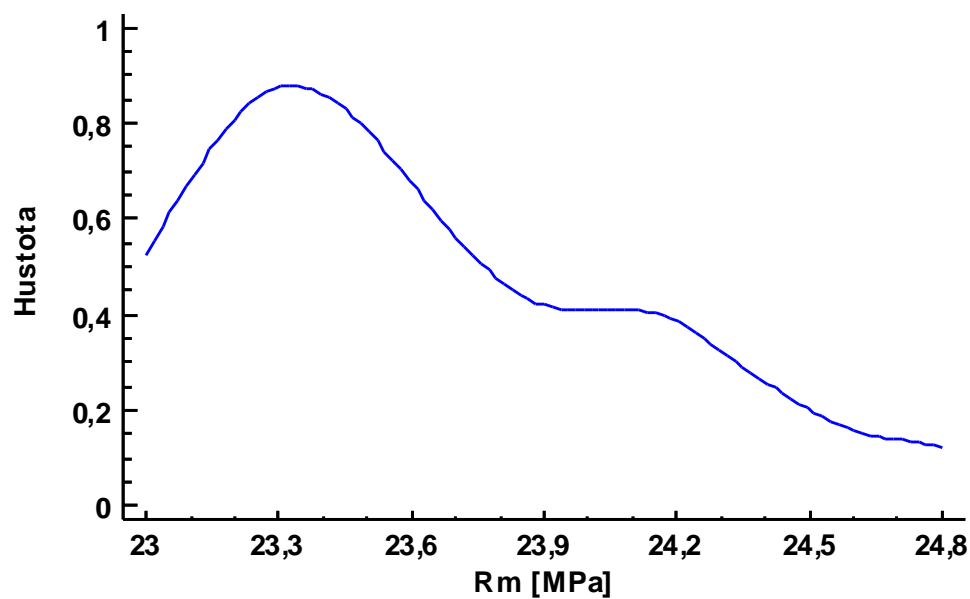
Parametry	Hodnoty
Průměr	23,6251 MPa
Medián	23,4965 MPa
Rozptyl	0,2623
Směrodatná odchylka	0,5121
Variační koeficient	2,16761 %
Střední chyba průměru	0,1322

Minimální hodnota	23,0165 MPa
Maximální hodnota	24,7685 MPa



Obr. 4.12 Porovnání naměřených hodnot meze pevnosti v tahu s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.12) vyplývá, že hodnoty meze pevnosti nedosahují hodnot udávaných výrobcem. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot **[23,3415; 23,9087]**.



Obr. 4.13 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro mez pevnosti v tahu.

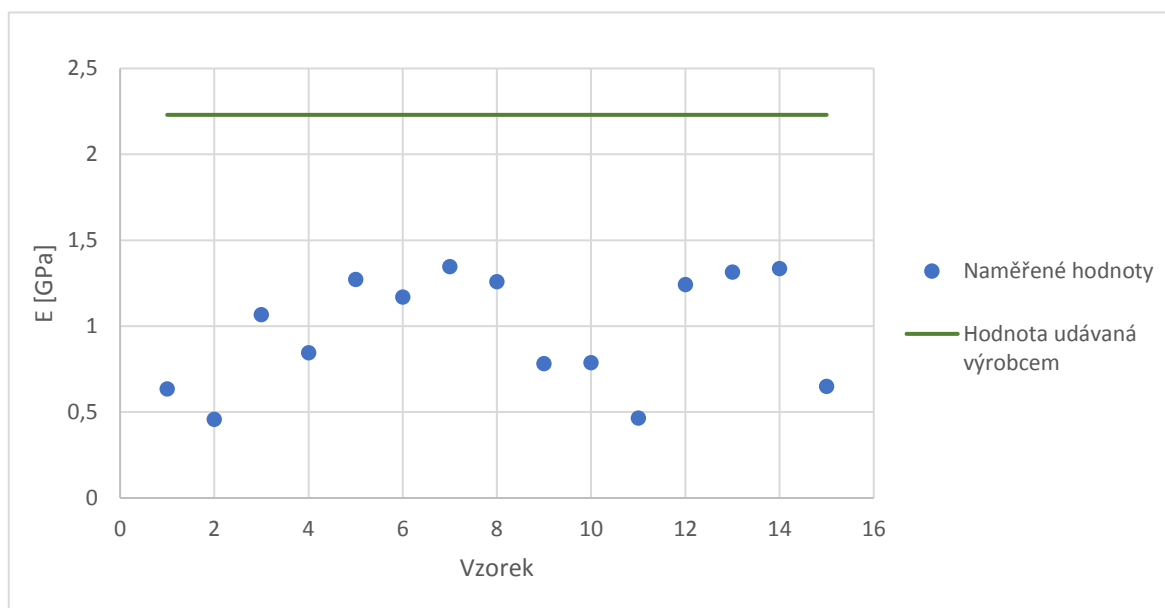
Z grafické závislosti (viz obr. 4.13) je patrné, že část hodnot vykazuje nesymetrii, tato nesymetrie může být způsobena skrytými vadami ve vnitřní části vzorku.

### Modul pružnosti v tahu

Postup statistického vyhodnocování naměřených dat je totožný jako u meze pevnosti. Tabulka (viz tab. 4.10) zobrazuje základní statistické parametry.

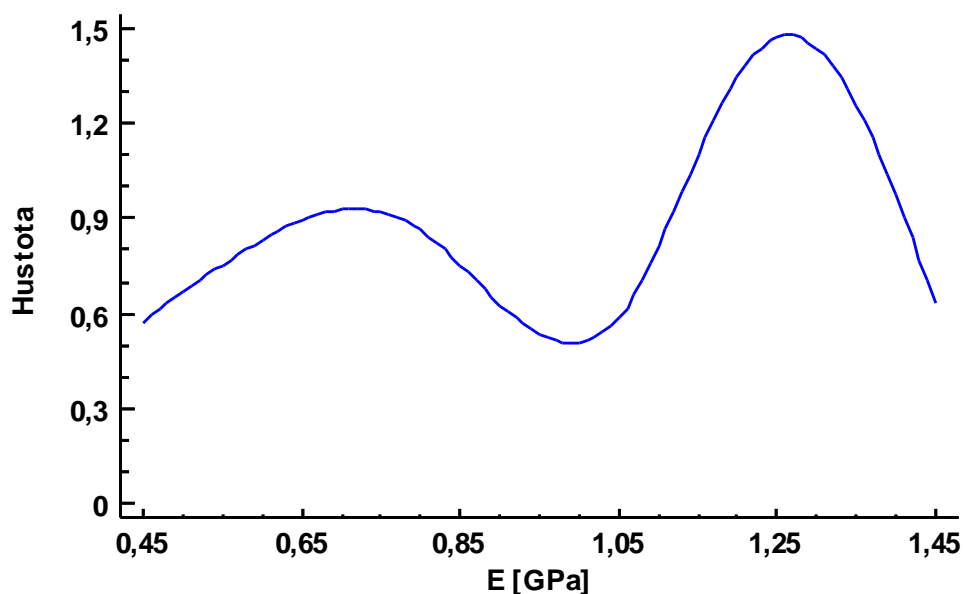
Tab. 4.10 Základní statistické parametry modulu pružnosti v tahu.

Parametry	Hodnoty
Průměr	0,9754 GPa
Medián	1,0665 GPa
Rozptyl	0,1077
Směrodatná odchylka	0,3281
Variační koeficient	33,6429 %
Střední chyba průměru	0,0847
Minimální hodnota	0,4580 GPa
Maximální hodnota	1,3459 GPa



Obr. 4.14 Porovnání naměřených hodnot modulu pružnosti s hodnotou udávanou výrobcem.

Grafické závislosti (viz obr. 4.14) vykazuje velký rozptyl hodnot. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot **[0,793645; 1,15708]**.



Obr. 4.15 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro modul pružnosti v tahu.

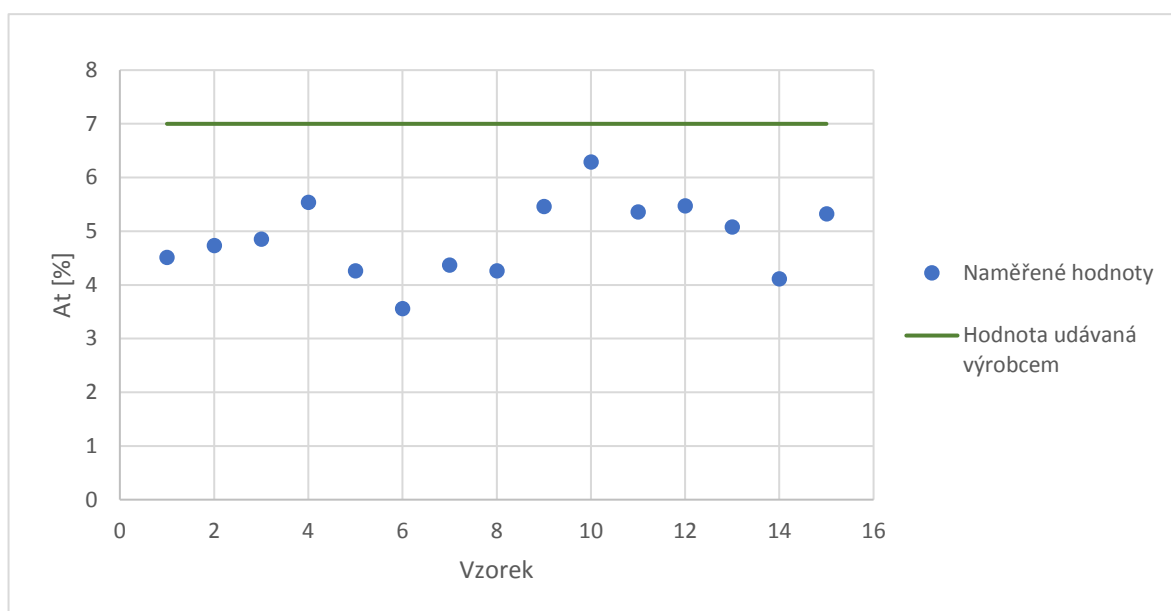
Z grafické závislosti (viz obr. 4.15) vyplývá, že výsledky vykazují rozdělení do dvou skupin, i z tohoto důvodu je interval spolehlivosti širší než u předešlých veličin.

### Tažnost

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.11).

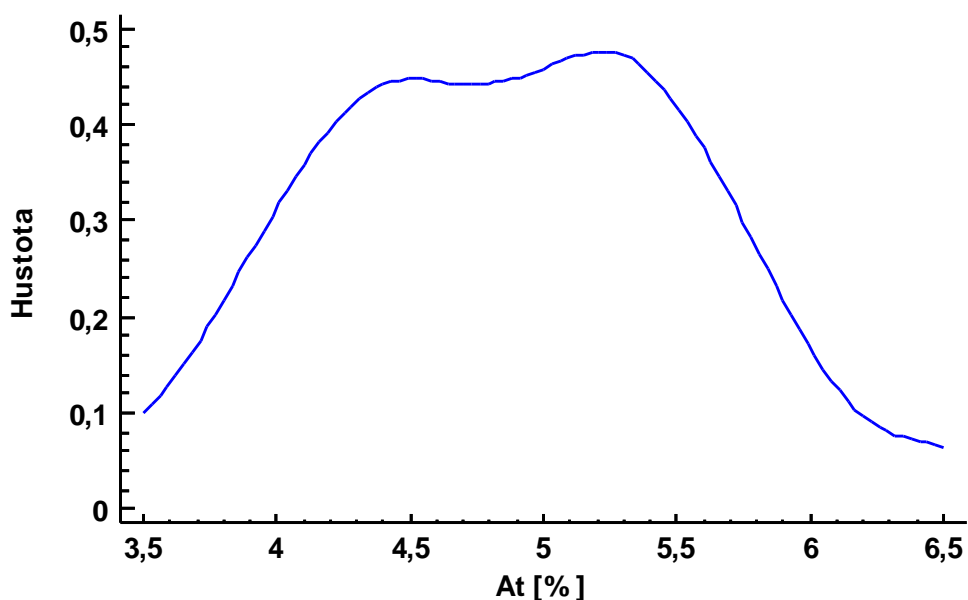
Tab. 4.11 Základní statistické parametry tažnosti.

Parametry	Hodnoty
Průměr	4,8765 %
Medián	4,8509 %
Rozptyl	0,5056
Směrodatná odchylka	0,7111
Variační koeficient	14,5812 %
Střední chyba průměru	0,1836
Minimální hodnota	3,5574 %
Maximální hodnota	6,2872 %



Obr. 4.16 Porovnání naměřených hodnot tažnosti s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.16) lze vidět, že hodnoty tažnosti nedosahují udávané hodnoty. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot **[4,48272; 5,27025]**.



Obr. 4.17 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro tažnost.

Na grafické závislosti (viz obr. 4.17) lze vidět, že vrchní část je poměrně plochá, což má za následek širší interval spolehlivosti. Tato oblast je způsobena větším rozptylem vzorků.

#### 4.1.4 ABS vertikální tisk 2018

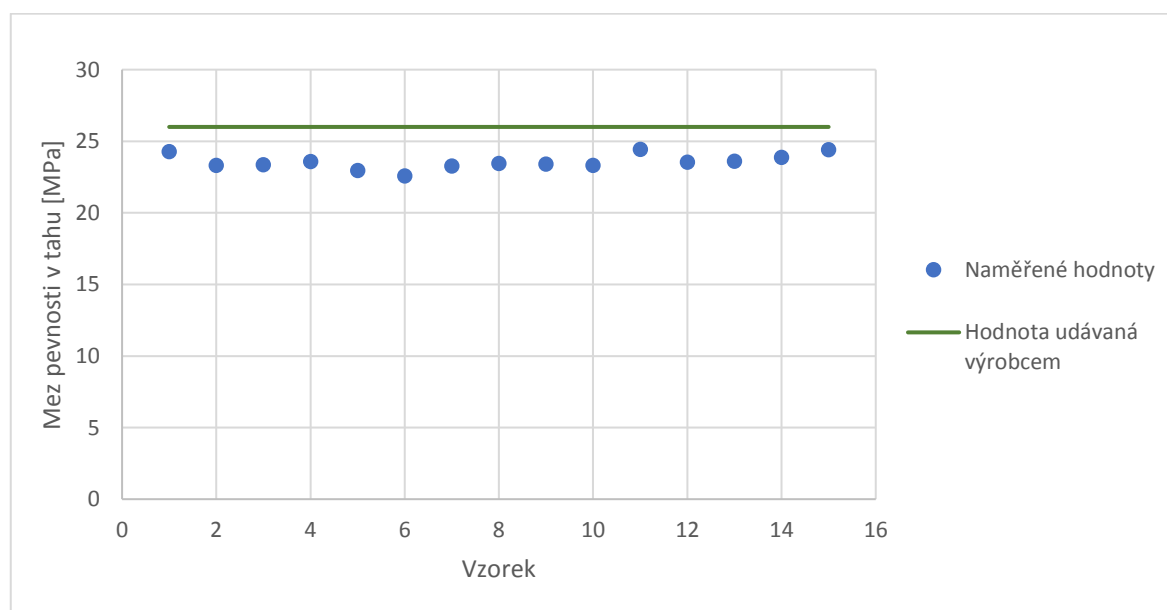
Materiál byl vyhodnocen stejným postupem jako předešlé typy materiálů. Pro vyhodnocení byl také použit statistický program STATGRAPHICS.

##### Mez pevnosti v tahu

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.12).

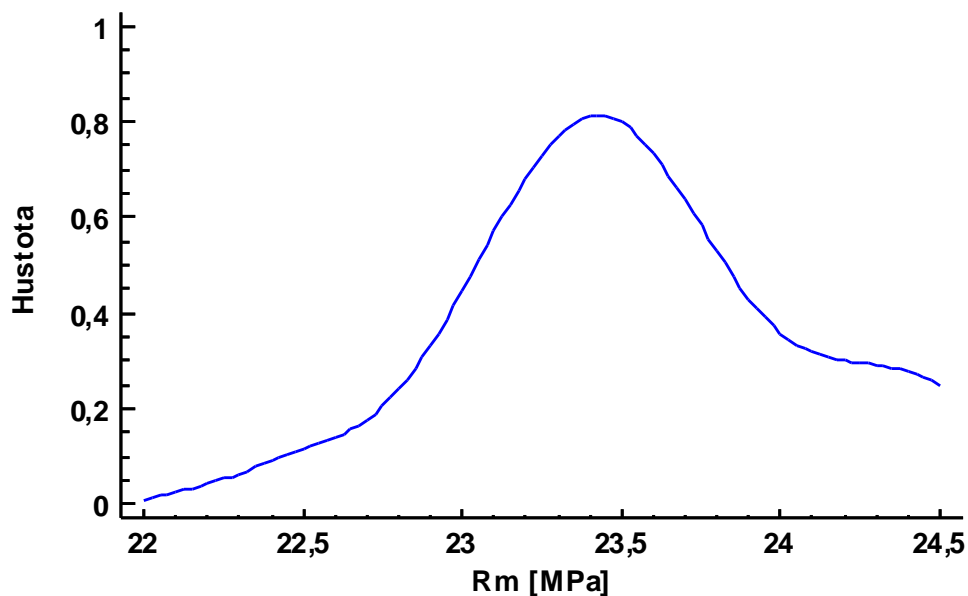
Tab. 4.12 Základní statistické parametry meze pevnosti v tahu.

Parametry	Hodnoty
Průměr	23,5599 MPa
Medián	23,4459 MPa
Rozptyl	0,2642
Směrodatná odchylka	0,5140
Variační koeficient	2,1817 %
Střední chyba průměru	0,1327
Minimální hodnota	22,5786 MPa
Maximální hodnota	24,4392 MPa



Obr. 4.18 Porovnání naměřených hodnot meze pevnosti v tahu s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.18) vyplývá, že hodnoty meze pevnosti nedosahují hodnot udávaných výrobcem. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot [23,2752; 23,8445].



Obr. 4.19 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro mez pevnosti v tahu.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.19) lze vyvodit, že nevyšší hodnota hustoty je 23,4 MPa.

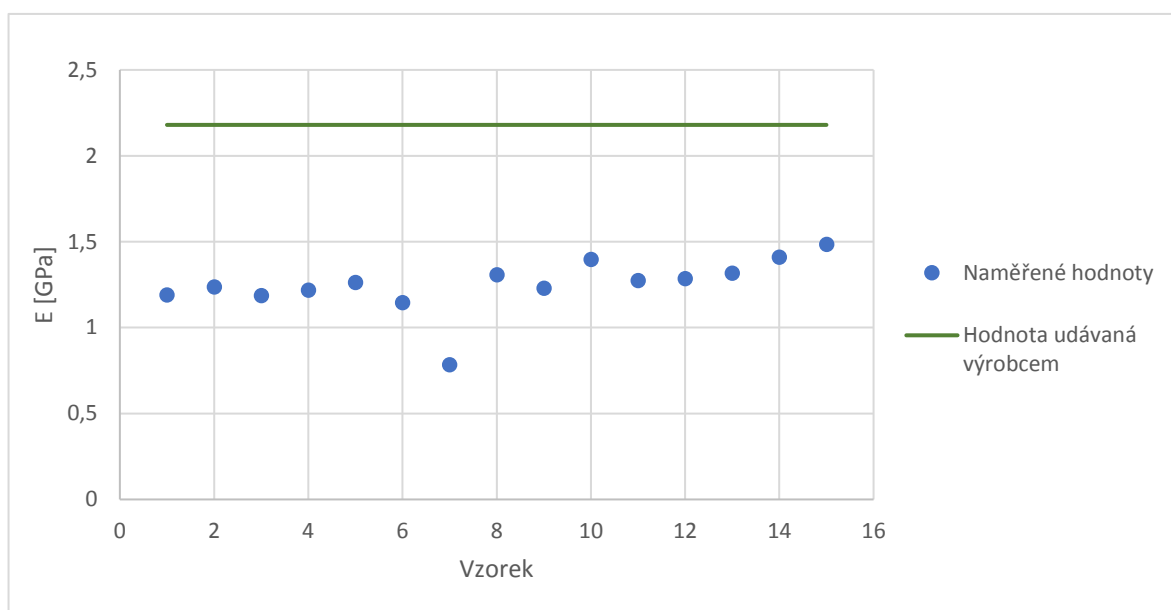
### Modul pružnosti v tahu

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.13).

Tab. 4.13 Základní statistické parametry modulu pružnosti v tahu.

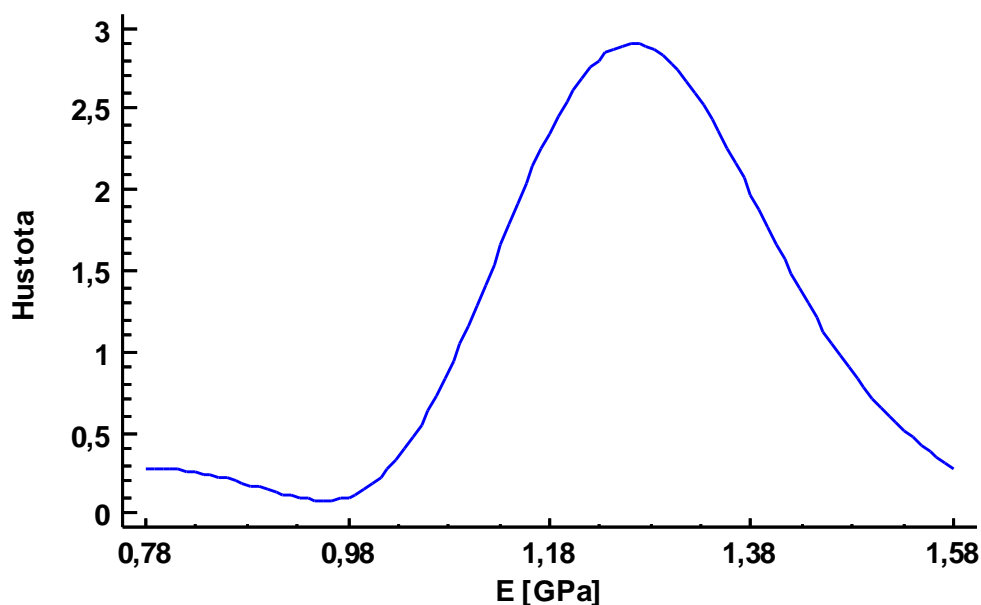
Parametry	Hodnoty
Průměr	1,2496 GPa
Medián	1,2640 GPa
Rozptyl	0,0250
Směrodatná odchylka	0,1570
Variační koeficient	12,6410 %
Střední chyba průměru	0,0408
Minimální hodnota	0,7845 GPa
Maximální hodnota	1,4848 GPa





Obr. 4.20 Porovnání naměřených hodnot modulu pružnosti s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.20) je patrné, že hodnoty modulu pružnosti jsou nižší než hodnoty udávané výrobcem. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot **[1,16208; 1,33702]**.



Obr. 4.21 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro modul pružnosti v tahu.

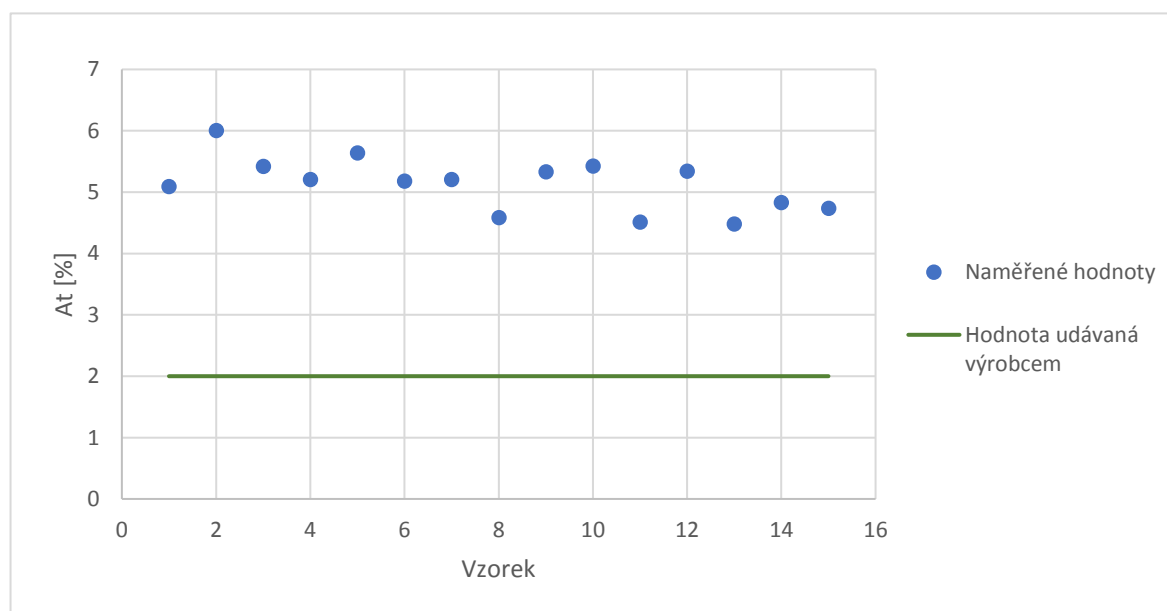
Z grafické závislosti (viz obr. 4.3) vyplývá, že hodnoty hustoty normálního rozdělení jsou přibližně symetrické okolo hodnoty 1,2 GPa. Část hodnot vykazuje asymetrii, která může být způsobena vadným vzorkem.

### Tažnost

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.14).

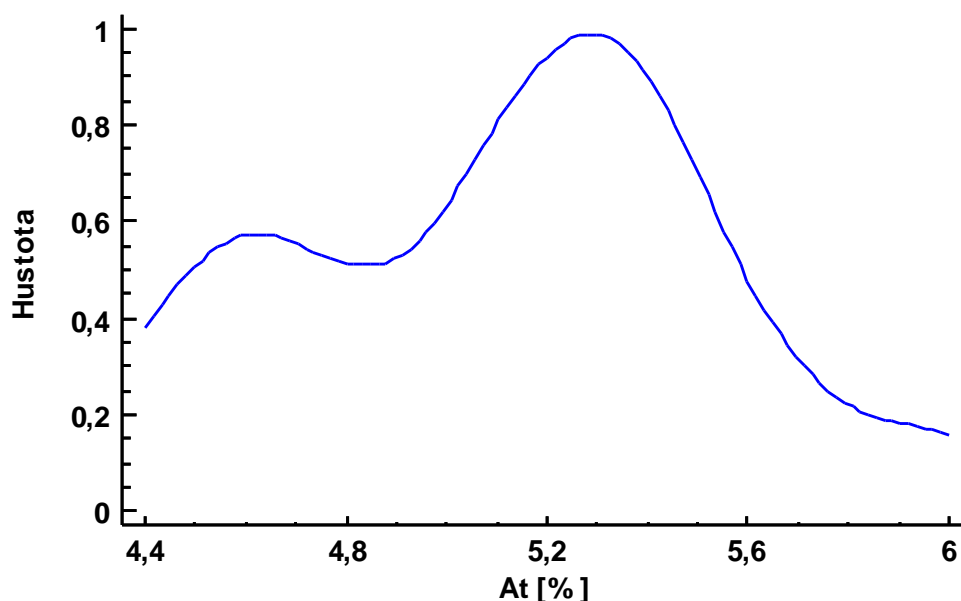
Tab. 4.14 Základní statistické parametry tažnosti.

Parametry	Hodnoty
Průměr	5,1296 %
Medián	5,2011 %
Rozptyl	0,1884
Směrodatná odchylka	0,4340
Variační koeficient	8,4612 %
Střední chyba průměru	0,1121
Minimální hodnota	4,4758 %
Maximální hodnota	5,9990 %



Obr. 4.22 Porovnání naměřených hodnot tažnosti s hodnotou udávanou výrobcem.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.9) lze vidět, že hodnoty tažnosti převyšují udávané hodnoty. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot **[4,88924; 5,36995]**.



Obr. 4.11 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro tažnost.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.5) je patrné, že během experimentu část vzorků vykazala nesymetrii. Tato nesymetrie může být způsobena vadou vzorku.

#### 4.1.5 Porovnání horizontálního a vertikálního tisku u materiálu ABS

Tato kapitola se zabývá srovnáním horizontálního a vertikálního tisku vzorků.

##### 4.1.5.1 ABS vertikální tisk 2013 vs. ABS horizontální tisk 2013

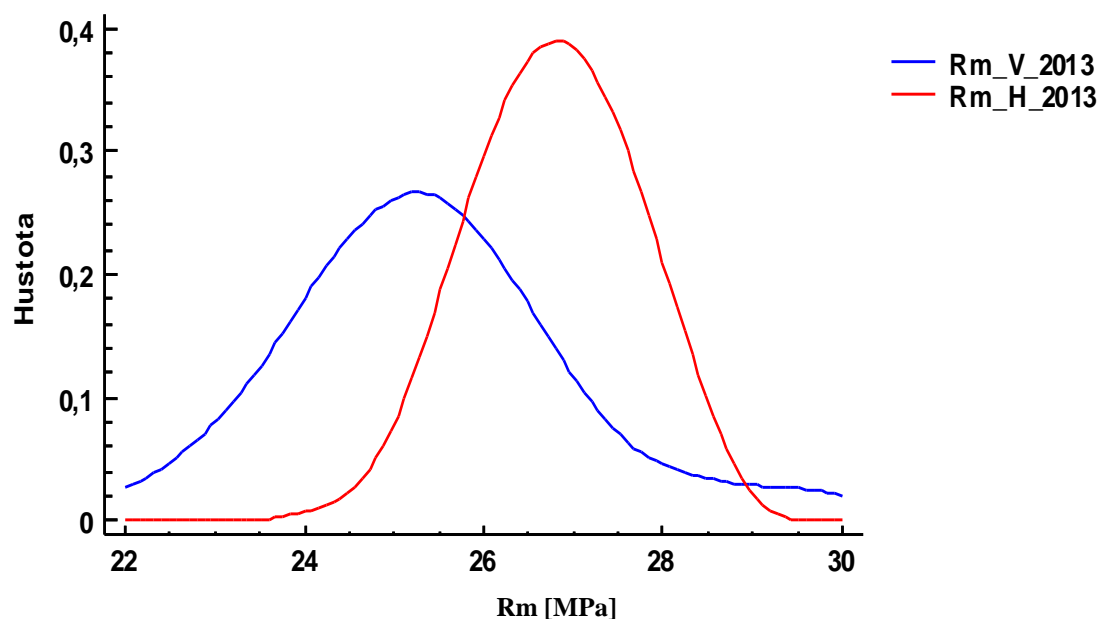
Hlavním důvodem porovnání horizontálního a vertikálního tisku je zjištění, zda mechanické vlastnosti materiálů závisí na směru kladeného materiálu.

#### Mez pevnosti v tahu

Tab. 4.15 Srovnání parametrů meze pevnosti vertikálního a horizontálního tisku 2013.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Horizontální tisk 2013
Průměr	25,3974 MPa	26,7819 MPa
Medián	25,3177 MPa	26,8256 MPa
Minimální hodnota	22,6328 MPa	25,6015 MPa
Maximální hodnota	29,1916 MPa	27,3169 MPa

Z tabulky (viz tab. 4.15) je patrné, že hodnoty horizontálního tisku dosahují celkově lepších výsledků.



Obr. 4.12 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení meze pevnosti v tahu pro vertikální a horizontální tisk 2013.

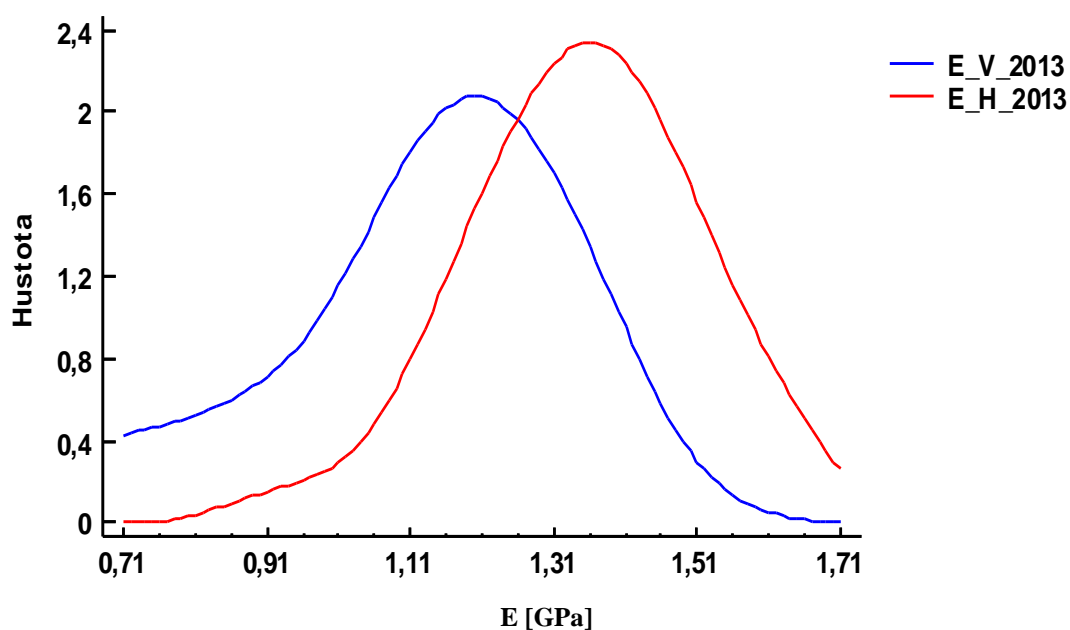
Z grafické závislosti (viz obr. 4.12) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.15), že horizontální tisk se vyznačuje vyššími hodnotami meze pevnosti.

### Modul pružnosti v tahu

Tab. 4.16 Srovnání parametrů modulu pružnosti vertikálního a horizontálního tisku 2013.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Horizontální tisk 2013
Průměr	1,1337 GPa	1,3503 GPa
Medián	1,1885 GPa	1,3336 GPa
Minimální hodnota	0,7159 GPa	1,0259 GPa
Maximální hodnota	1,4061 GPa	1,5478 GPa

Z tabulky (viz tab. 4.16) je patrné, že hodnoty horizontálního tisku dosahují celkově lepších výsledků.



Obr. 4.13 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení modulu pružnosti pro vertikální a horizontální tisk 2013.

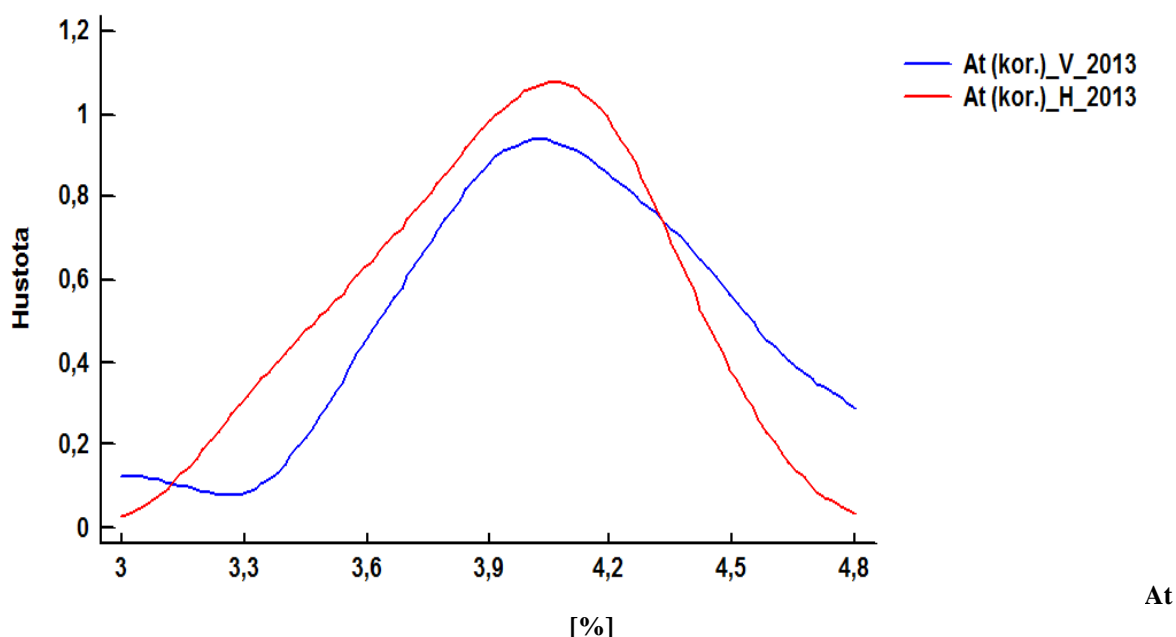
Z grafické závislosti (viz obr. 4.13) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.16), že horizontální tisk se vyznačuje vyššími hodnotami modulu pružnosti v tahu.

### Tažnost

Tab. 4.17 Srovnání parametrů tažnosti vertikálního a horizontálního tisku 2013.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Horizontální tisk 2013
Průměr	4,0646 %	3,9454 %
Medián	4,1720 %	3,9724 %
Minimální hodnota	3,0056 %	3,3911 %
Maximální hodnota	4,7661 %	4,4654 %

V tabulce (viz tab. 4.17) lze vidět, že hodnoty parametrů pro horizontální a vertikální tisk dosahují velmi podobných velikostí.



Obr. 4.14 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení modulu pružnosti pro vertikální a horizontální tisk 2013.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.14) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.17), že horizontální tisk a vertikální tisk dosahuje přibližně stejných hodnot.

#### 4.1.5.2 ABS vertikální tisk 2018 vs. ABS horizontální tisk 2018

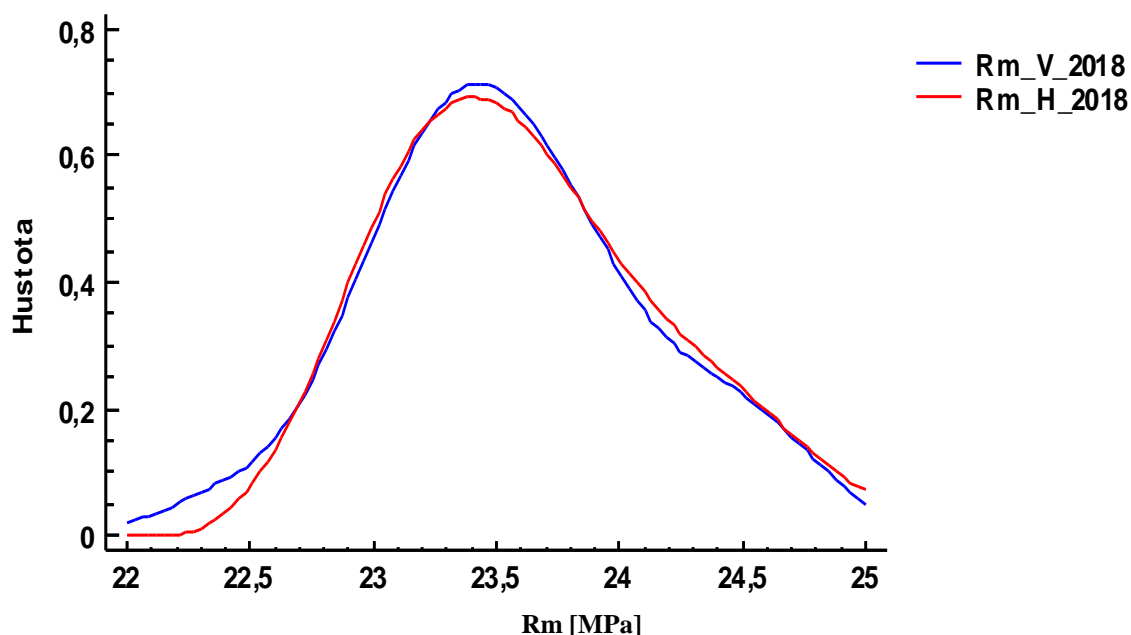
Princip porovnání je totožný jako v předchozí kapitole (viz. kap. 4.1.4.1), hlavním cílem je zjištění rozdílných vlastností v závislosti na směru tisku.

#### Mez pevnosti v tahu

Tab. 4.18 Srovnání parametrů meze pevnosti vertikálního a horizontálního tisku 2013.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Horizontální tisk 2013
Průměr	23,5599 MPa	23,6251 MPa
Medián	23,4459 MPa	23,4965 MPa
Minimální hodnota	22,5786 MPa	23,0165 MPa
Maximální hodnota	24,4392 MPa	24,7685 MPa

Z tabulky (viz tab. 4.18) je patrné, že hodnoty horizontálního a vertikálního tisku dosahují přibližně stejných hodnot.



Obr. 4.15 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení meze pevnosti v tahu pro vertikální a horizontální tisk 2018.

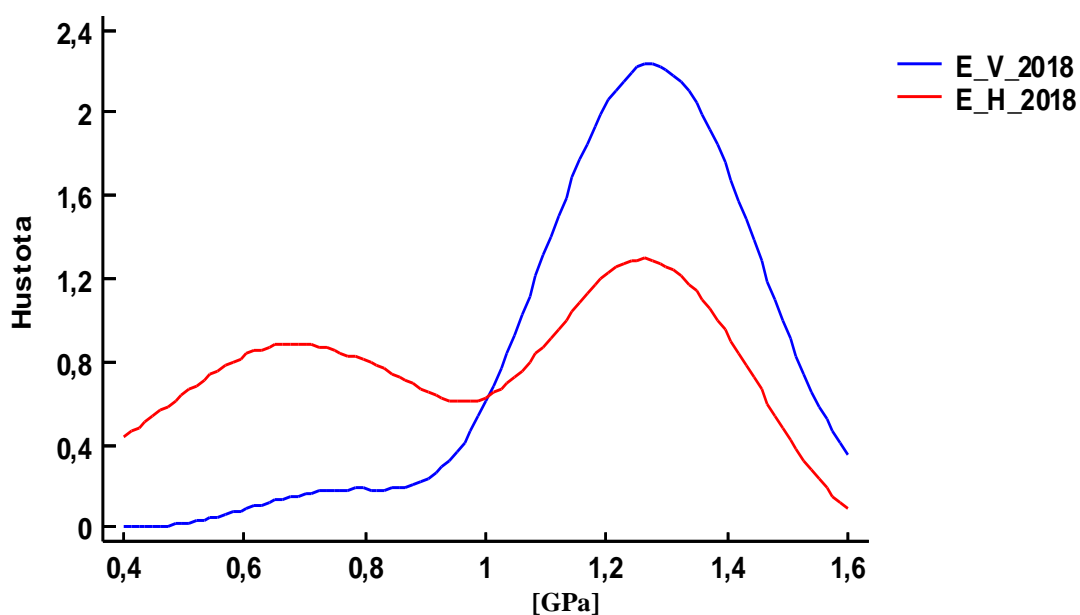
Z grafické závislosti (viz obr. 4.15) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.18), že hodnoty horizontálního a vertikálního tisku dosahují přibližně stejných hodnot.

### Modul pružnosti v tahu

Tab. 4.19 Srovnání parametrů modulu pružnosti vertikálního a horizontálního tisku 2013.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Horizontální tisk 2013
Průměr	1,2496 GPa	0,9754 GPa
Medián	1,2640 GPa	1,0665 GPa
Minimální hodnota	0,7845 GPa	0,4580 GPa
Maximální hodnota	1,4848 GPa	1,3459 GPa

Z tabulky (viz tab. 4.16) je patrné, že hodnoty horizontálního tisku dosahují celkově lepších výsledků.



Obr. 4.16 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení modulu pružnosti pro vertikální a horizontální tisk 2018.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.16) je patrné, že vertikální tisk dosahuje lepší symetrie oproti horizontálnímu tisku.

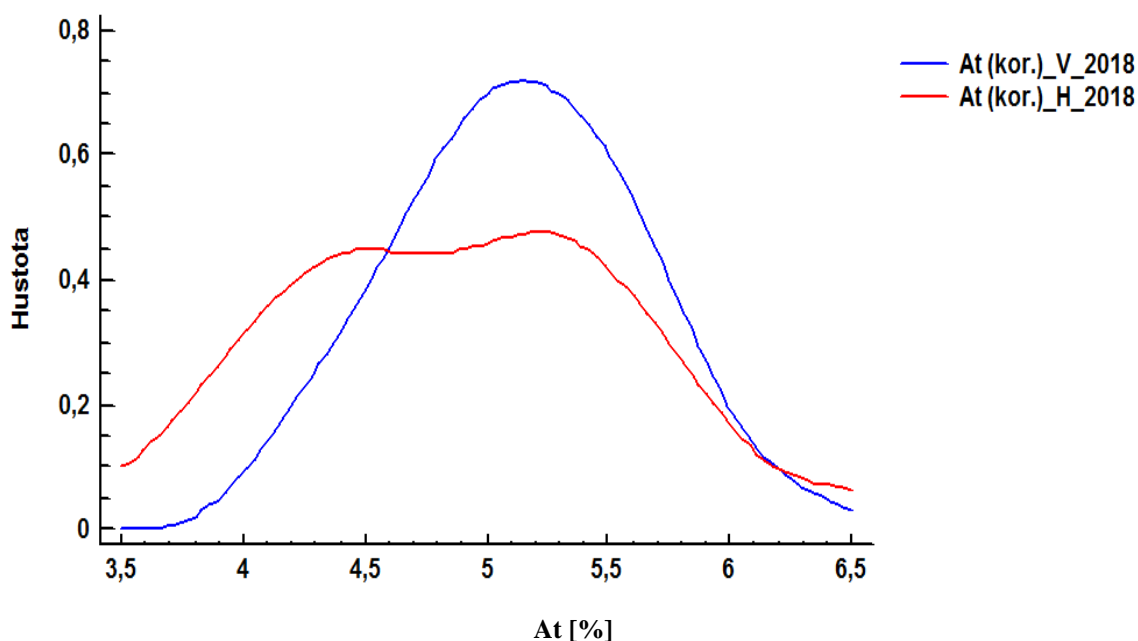
### Tažnost

Tab. 4.20 Srovnání parametrů tažnosti vertikálního a horizontálního tisku 2018.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Horizontální tisk 2013
Průměr	5,1296 %	4,8765 %
Medián	5,2011 %	4,8509 %
Minimální hodnota	4,4758 %	3,5574 %
Maximální hodnota	5,9990 %	6,2872 %

V tabulce (viz tab. 4.20) lze vidět, že hodnoty parametrů pro horizontální a vertikální tisk dosahují velmi podobných velikostí.





Obr. 4.17 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení modulu pružnosti pro vertikální a horizontální tisk 2018.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.17) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.20), že horizontální tisk a vertikální tisk dosahuje přibližně stejných hodnot.

#### 4.1.5.3 Zhodnocení rozdílů pro horizontální a vertikální tisk

Ze statistického vyhodnocení experimentálně naměřených hodnot vyplývá, že materiál vyrobený v roce 2013 vykazuje rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi vertikálního a horizontálního tisku. Horizontální tisk vykazuje vyšší hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti na rozdíl od tažnosti, která je přibližně stejná pro oba druhy vzorků.

Rozdílné chování oproti materiálu z roku 2013 vykazuje materiál vyrobený v roce 2018, u tohoto materiálu byly hodnoty vyhodnocených parametrů přibližně stejné.

#### 4.1.6 Porovnání materiálu ABS z roku 2013 vs. materiál ABS z roku 2018

Materiál ABS je náchylný na stárnutí, které zapříčiňuje degradaci mechanických vlastností. Cílem tohoto srovnání je porovnání materiálu rozdílného data výroby a porovnání jejich mechanických vlastností.

##### 4.1.6.1 ABS vertikální tisk 2013 vs. ABS vertikální tisk 2018

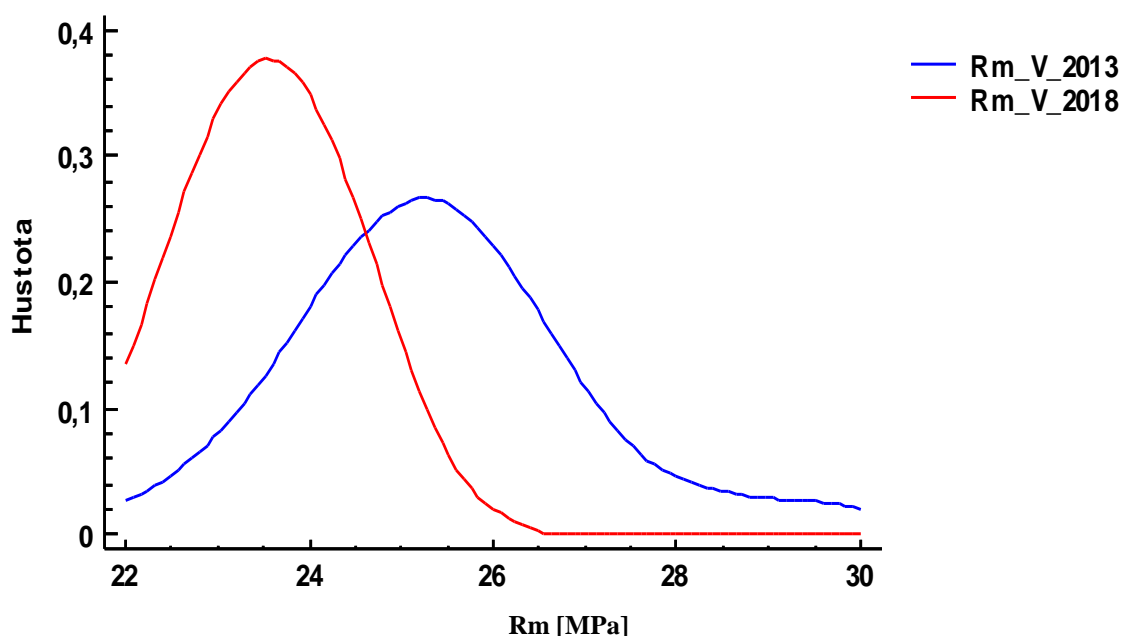
Oba tyto typy vzorků byly tisknuty stejnými parametry. Rozdílným faktorem je datum výroby jednotlivých materiálů použitých pro výrobu zkušebních vzorků. Při výrobě jednotlivých vzorků, jak z materiálu vyrobeného v roce 2018, tak z materiálu vyrobeného v roce 2013, bylo použito nově rozbalené, neporušené balení v takovém stavu, v jakém je dodává výrobce.

### Mez pevnosti v tahu

Tab. 4.21 Srovnání parametrů meze pevnosti vertikálního tisku z roku 2013 a z roku 2018.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Vertikální tisk 2018
Průměr	25,3974 MPa	23,5599 MPa
Medián	25,3177 MPa	23,4459 MPa
Minimální hodnota	22,6328 MPa	22,5786 MPa
Maximální hodnota	29,1916 MPa	24,4392 MPa

Z tabulky (viz tab. 4.21) je patrné, že hodnoty meze pevnosti pro materiál z roku 2013 vykazují vyšší hodnoty průměrné meze pevnosti než u materiálu z roku 2018.



Obr. 4.18 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení meze pevnosti v tahu pro vertikální tisk z materiálu vyrobeném v roce 2013 a z roku 2018.

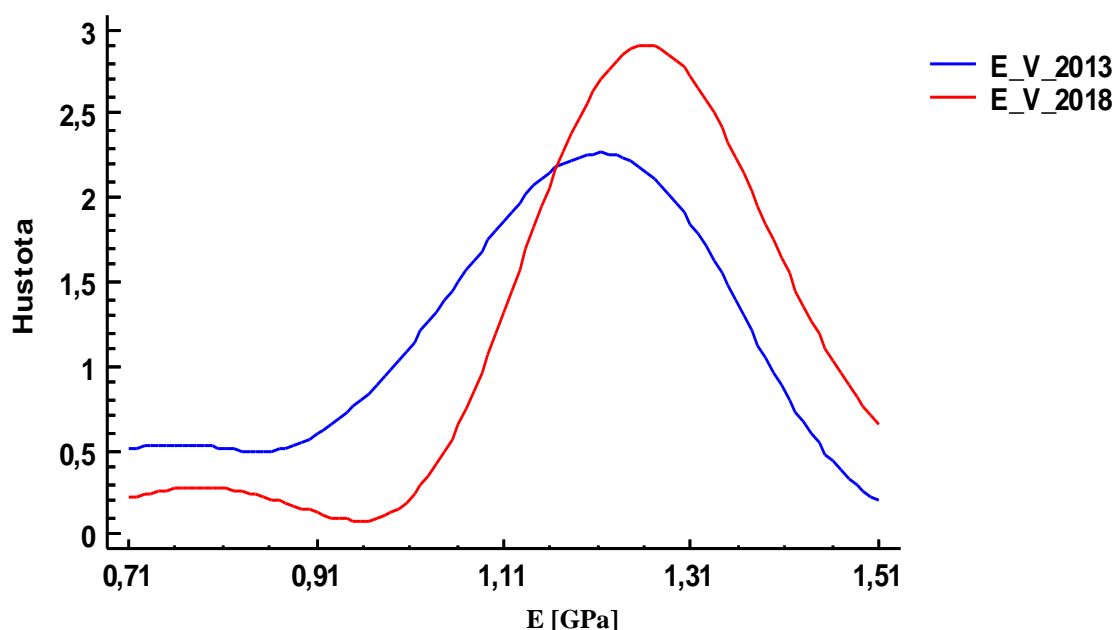
Z grafické závislosti (viz obr. 4.18) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.), že hodnoty vertikálního tisku z materiálu z roku 2013 dosahují vyšších hodnot meze pevnosti.

### Modul pružnosti v tahu

Tab. 4.22 Srovnání parametrů modulu pružnosti vertikálního tisku z roku 2013 a z roku 2018.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Vertikální tisk 2018
Průměr	1,1337 GPa	1,2496 GPa
Medián	1,1885 GPa	1,2640 GPa
Minimální hodnota	0,7159 GPa	0,7845 GPa
Maximální hodnota	1,4061 GPa	1,4848 GPa

Z tabulky (viz tab. 4.22) je zřejmé, že hodnoty vertikálního tisku z materiálu z roku 2018 dosahují celkově lepších výsledků.



Obr. 4.19 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení modulu pružnosti pro vertikální tisk z materiálu vyrobeném v roce 2013 a z roku 2018.

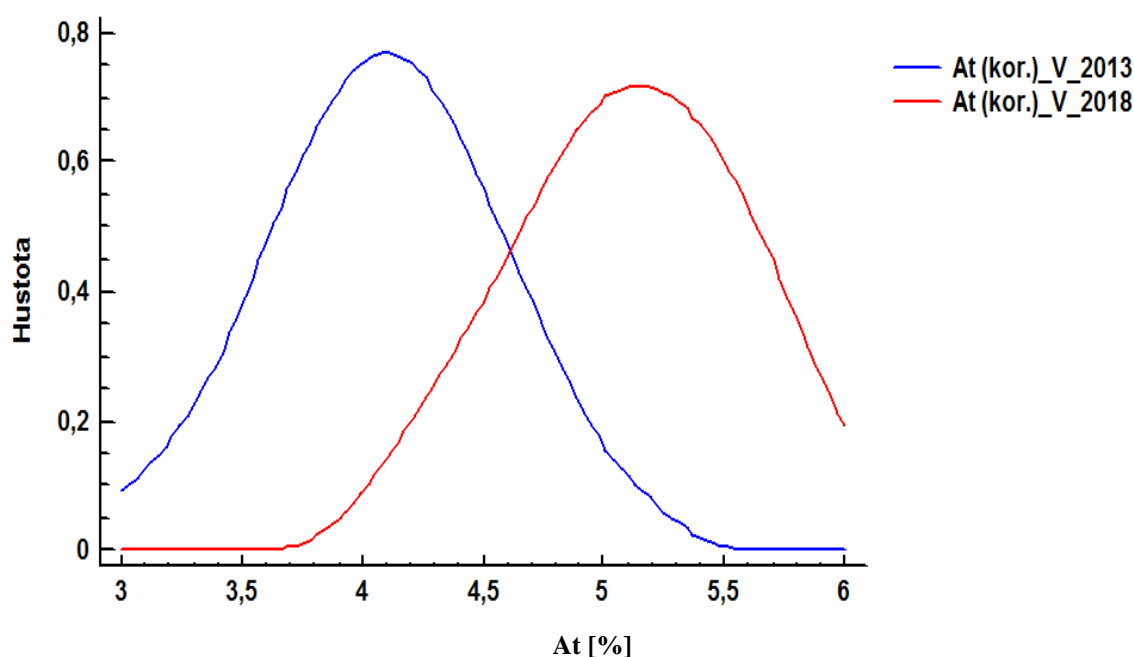
Z grafické závislosti (viz obr. 4.19) vyplývá, že materiál z roku 2018, který byl použit pro zhotovení vzorků, vykazuje mírně lepší výsledky než materiál z roku 2013.

### Tažnost

Tab. 4.23 Srovnání parametrů tažnosti vertikálního tisku z roku 2013 a z roku 2018.

Parametry	Vertikální tisk 2013	Vertikální tisk 2018
Průměr	4,0646 %	5,1296 %
Medián	4,1720 %	5,2011 %
Minimální hodnota	3,0056 %	4,4758 %
Maximální hodnota	4,7661 %	5,9990 %

Z tabulky (viz tab. 4.23) je zřejmé, že hodnoty vertikálního tisku z materiálu z roku 2018 dosahují celkově lepší hodnoty tažnosti než vzorky vytisknuté z materiálu z roku 2013.



Obr. 4.20 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení modulu pružnosti pro vertikální tisk z materiálu vyrobeném v roce 2013 a z roku 2018.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.20) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.23), že vertikální tisk z roku 2018 dosahuje lepších hodnot než materiál z roku 2013.

#### 4.1.6.2 ABS horizontální tisk 2013 vs. ABS horizontální tisk 2018

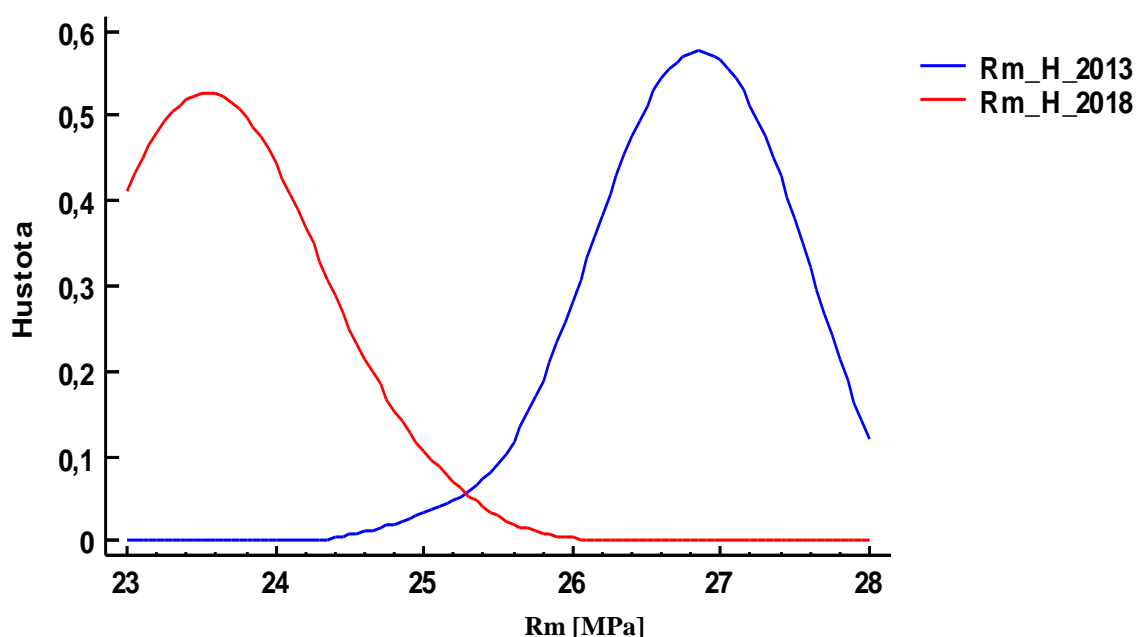
Princip vyhodnocení a důvod je stejný jako v předchozí kapitole (viz kap. 4.1.6.1). Cílem je zjištění vlivu stáří vstupního materiálu na výsledné mechanické vlastnosti.

#### Mez pevnosti v tahu

Tab. 4.24 Srovnání parametrů meze pevnosti horizontální tisku z roku 2013 a z roku 2018.

Parametry	Horizontální tisk 2013	Horizontální tisk 2018
Průměr	26,7819 MPa	23,6251 MPa
Medián	26,8256 MPa	23,4965 MPa
Minimální hodnota	25,6015 MPa	23,0165 MPa
Maximální hodnota	27,3169 MPa	24,7685 MPa

Z tabulky (viz tab. 4.24) je patrné, že hodnoty meze pevnosti pro materiál z roku 2013 vykazují vyšší hodnoty průměrné meze pevnosti než u materiálu z roku 2018.



Obr. 4.21 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení meze pevnosti v tahu pro horizontální tisk z materiálu vyrobeném v roce 2013 a z roku 2018.

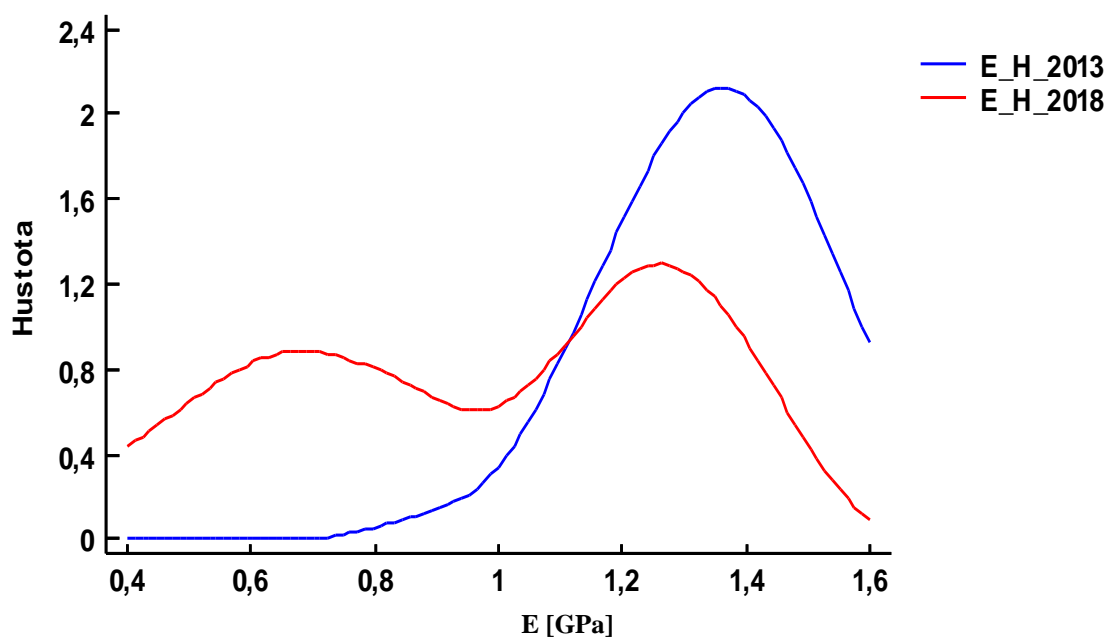
Z grafické závislosti (viz obr. 4.21) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.24), že hodnoty horizontálního tisku z materiálu z roku 2013 dosahují vyšších hodnot meze pevnosti než materiál z roku 2018.

### Modul pružnosti v tahu

Tab. 4.25 Srovnání parametrů modulu pružnosti horizontálního tisku z roku 2013 a z roku 2018.

Parametry	Horizontální tisk 2013	Horizontální tisk 2018
Průměr	1,3503 GPa	0,9754 GPa
Medián	1,3336 GPa	1,0665 GPa
Minimální hodnota	1,0259 GPa	0,4580 GPa
Maximální hodnota	1,5478 GPa	1,3459 GPa

Ze statistických parametrů (viz tab. 4.25) vyplývá, že hodnoty horizontálního tisku z materiálu z roku 2013 dosahují celkově lepších výsledků.



Obr. 4.22 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení modulu pružnosti pro horizontální tisk z materiálu vyrobeném v roce 2013 a z roku 2018.

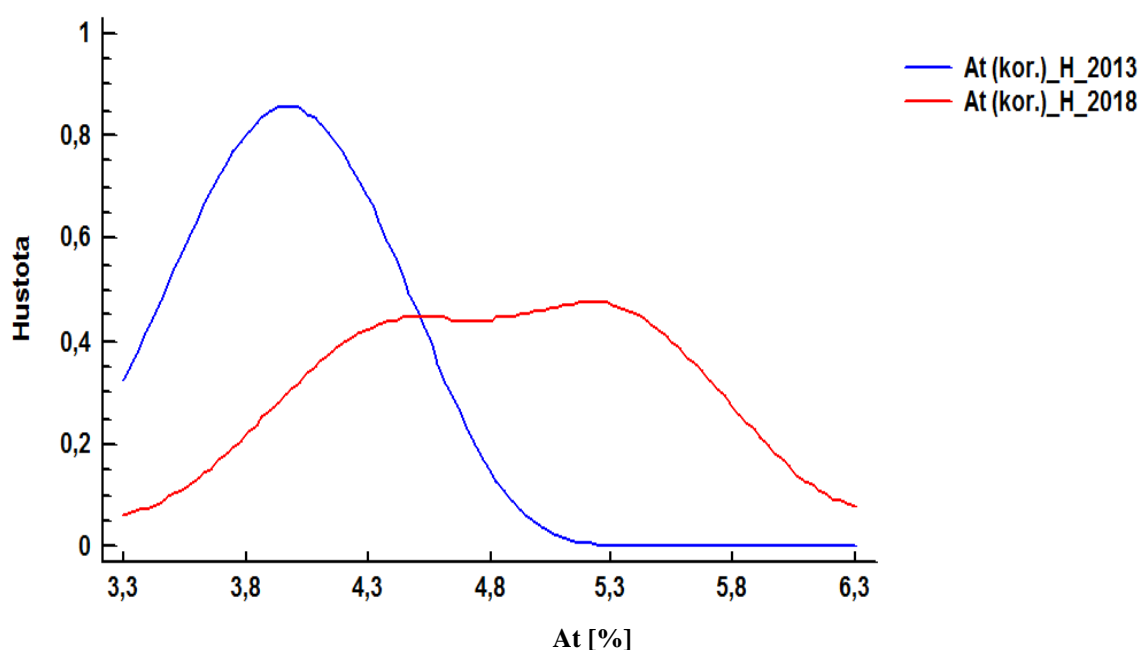
Z grafické závislosti (viz obr. 4.22) však vyplývá, že materiál z roku 2018 vykazuje rozdělení do dvou skupin, což má vliv i na konečné vyhodnocení.

### Tažnost

Tab. 4.26 Srovnání parametrů tažnosti horizontálního tisku z roku 2013 a z roku 2018.

Parametry	Horizontální tisk 2013	Horizontální tisk 2018
Průměr	3,9454 %	4,8765 %
Medián	3,9724 %	4,8509 %
Minimální hodnota	3,3911 %	3,5574 %
Maximální hodnota	4,4654 %	6,2872 %

Z tabulky (viz tab. 4.26) je zřejmé, že hodnoty horizontálního tisku z materiálu z roku 2018 dosahují celkově lepší hodnoty tažnosti než vzorky vytisknuté z materiálu z roku 2013.



Obr. 4.23 Srovnání grafických závislostí hustoty normálního rozdělení modulu pružnosti pro horizontální tisk z materiálu vyrobeném v roce 2013 a z roku 2018.

Z grafické závislosti (viz obr. 4.20) vyplývá podobný závěr jako ze statistických parametrů (viz tab. 4.23), že horizontální tisk z roku 2018 dosahuje lepších hodnot než materiál z roku 2013.

#### 4.1.6.3 Zhodnocení rozdílů mezi materiálem z roku 2013 a z roku 2018

Obecně se materiál z roku 2018 vyznačuje lepší tažností než materiál z roku 2013. Avšak materiál z roku 2013 dosahuje lepších výsledků v oblasti meze pevnosti.

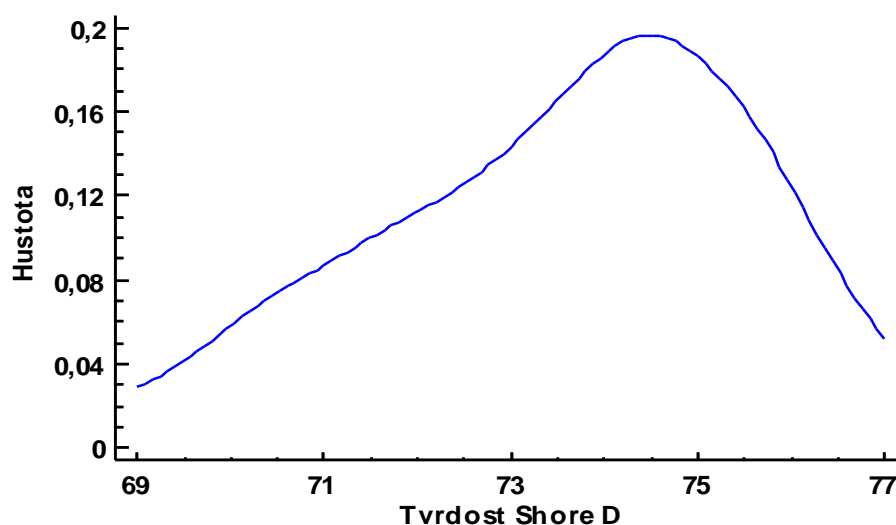
Srovnáním materiálů s rozdílným datem výroby materiálů bylo dokázáno, že stáří materiálů hraje významnou roli v konečných mechanických vlastnostech.

#### 4.1.7 Vyhodnocení tvrdosti u materiálu ABS

Tvrdost materiálu byla stanovena zkušebním zařízením (viz obr. 3.21). Základní statistické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 4.27).

Tab. 4.27 Základní statistické parametry tvrdosti.

Parametry	Hodnoty
Průměr	73,5867
Medián	74,1000
Rozptyl	4,0227
Směrodatná odchylka	2,0057
Variační koeficient	2,7256 %
Střední chyba průměru	0,5179
Minimální hodnota	69,5000
Maximální hodnota	76,7000



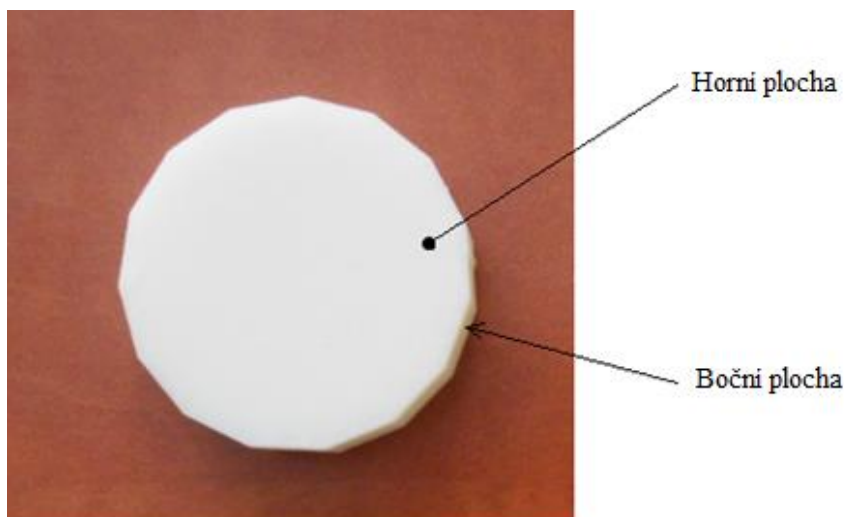
Obr. 4.24 Grafická závislost hustoty normálního rozdělení pro tvrdost Shore D.



Z grafické závislosti je zřejmé, že nejvyšší hodnota hustoty se pohybuje okolo 74 HShD. Interval 95% spolehlivosti nabývá hodnot **[72,476; 74,6974]**.

#### 4.1.8 Vyhodnocení drsnosti povrchu u materiálu ABS

Pro vyhodnocení drsnosti povrchu byly vybrány dvě různé plochy. První plocha byla horní (viz obr. 4.25) (kolmá na trysku) a druhá byla boční (viz obr. 4.25), která je rovnoběžná na trysku.



Obr. 4.25 Znázornění vyhodnocovaných ploch pro měření drsnosti.

Výsledná drsnost povrchu je závislá na několika parametrech např.: průměru trysky a rychlosti pokládání vláken a výšce jednotlivých vrstev.

#### 3D parametry textury povrchu

V rámci měření 3D plochy (prostorových parametrů textury povrchu) byly k hodnocení vybrány základní amplitudové parametry  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_t$  a  $S_z$ , které představují skupinu parametrů prostorového hodnocení a vycházejí z rozložení výšek souřadnic profilu povrchu.

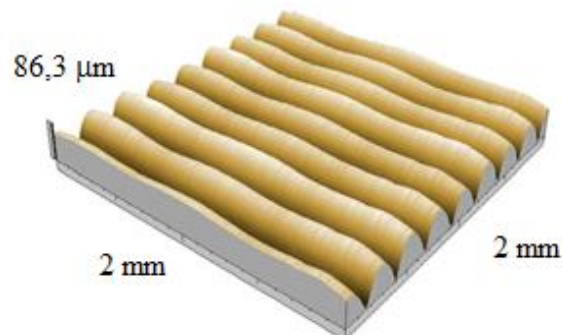
Tab. 4.28 Změřené hodnoty 3D parametrů textury povrchu.

Parametry	Název	Hodnota [ $\mu\text{m}$ ]	
		Horní strana	Boční strana
$S_a$	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	10,6	18,7
$S_q$	Průměrná kvadratická úchylka povrchu	13,8	22,1
$S_t$	Celková výška povrchu	67,1	85,3
$S_z$	Výška z deseti bodů povrchu	66,7	85,1

Z tabulky (viz tab. 4.28) je zřejmé, že hodnoty 3D parametrů textury povrchu dosahují lepších hodnot pro vrchní plochu.



Obr. 4.26 3D znázornění povrchu pro horní plochu.



Obr. 4.27 3D znázornění povrchu pro boční plochu.

Z obrázků (viz obr. 4.26 a 4.27) je patrné, že měřený povrch vykazuje určitou periodicitu. Tato periodicitu je způsobena kladením jednotlivých vláken vedle sebe.

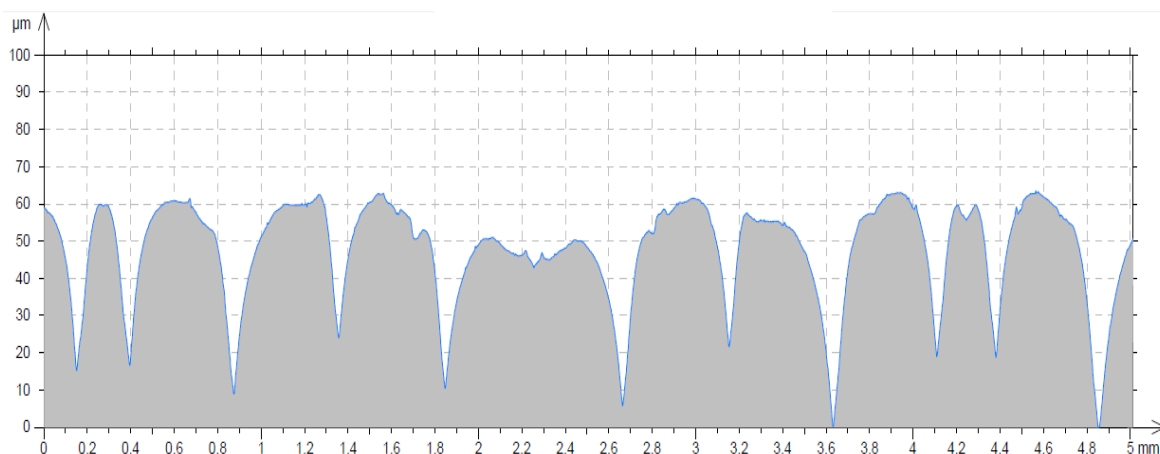
## 2D parametry textury povrchu

Z 2D parametrů drsnosti byly vybrány amplitudové (výškové) parametry  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  a  $R_z$ . Vlnitost byla hodnocena amplitudovými parametry  $W_a$ ,  $W_q$ ,  $W_t$  a  $W_z$ .

Tab. 4.29 Změřené hodnoty 2D parametrů drsnosti a vlnitosti.

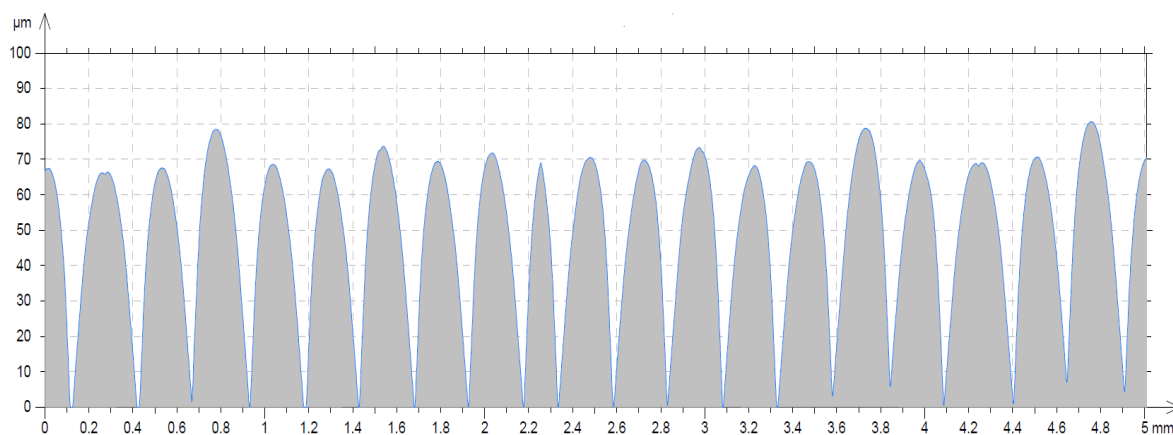
Parametry		Název	Hodnota [ $\mu\text{m}$ ]	
			Horní strana	Boční strana
Drsnost	$R_a$	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	8,2	18,7
	$R_q$	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	10,7	21,9
	$R_t$	Celková výška profilu drsnosti	51,1	76,6
	$R_z$	Největší výška profilu drsnosti	43,5	73,6
Vlnitost	$W_a$	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	3,6	1,68
	$W_q$	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	4,0	1,98
	$W_t$	Celková výška profilu vlnitosti	13,6	8,99
	$W_z$	Největší výška profilu vlnitosti	10,7	4,42

Tabulka (viz tab. 4.29) znázorňuje 2D parametry drsnosti a vlnitosti materiálu ABS. Z tabulky vyplývá, že hodnoty drsnosti jsou lepší pro horní stranu, ale naopak vlnitost dosahuje lepších hodnot pro boční stranu.



Obr. 4.28 Profil povrchu měřené oblasti horní plochy.

Obrázek (viz obr. 4.28) znázorňuje 2D profil povrchu horní tisknuté plochy. Na obrázku jsou zřejmé velké prohlubně, které jsou způsobené nedokonalým kladením jednotlivých vláken vedle sebe.



Obr. 4.29 Profil povrchu měřené oblasti boční plochy.

Obrázek (viz obr. 4.29) znázorňuje 2D profil povrchu boční tisknuté plochy. Z obrázku je patrné, že výsledný povrch vykazuje určitou periodicitu. Tato periodicitu je způsobena výškou jednotlivých vrstev. Tiskárna, na které byl tento vzorek zhotoven, má přednastavenou výšku vrstvy na 0,254 mm. Při bližším pohledu na obrázek (viz obr. 4.29) je možné si všimnout, že jednotlivé propady se přibližně opakují dle této hodnoty (0,254 mm).

Výsledná drsnost povrchu je výrazně ovlivněna parametry tisku. Hodnoty, které jsou zde udávány, lze použít pouze pro parametry (výška vrstvy 0,254 mm, teplota tiskové hlavy 293 °C, teplota komory 75 °C a rychlost tisku 20 cm<sup>3</sup>/h) použité při výrobě tohoto vzorku.

Hodnoty zde udávány jsou pro povrch bez jakýchkoliv úprav (tak jak byl vzorek vytažen z 3D tiskárny). Výslednou drsnost a vlnitost lze samozřejmě zlepšit např. broušením, leštěním a kytováním.

## 4.2 Vyhodnocení ostatních zkoušených materiálů

Vyhodnocení materiálu PLA (viz přílohy 1 až 5) bylo provedeno podobným postupem jako u materiálu ABS s tím rozdílem, že pro tento konkrétní materiál nejsou známe referenční hodnoty meze pevnosti, modulu pružnosti, tažnosti a tvrdosti. Hlavním důvodem je, že tento materiál je používán pro hobby tiskárny RepRap.

Vyhodnocení materiálu nylon (viz přílohy 6 až 16) proběhlo stejným způsobem jako u materiálů ABS (viz kap. 4.1). Hodnoty udávané výrobcem použité ke srovnání byly určeny z materiálového listu (viz příloha 30). Protože doba mezi tisknutím vzorku a samotným trháním byla jeden den (vzorky byly namočený ve vodě), byly jako referenční hodnoty použity údaje pro vlhký materiál.

U materiálu SG 2000 byly známy pouze hodnoty udávané výrobcem - mez pevnosti v tahu a tvrdosti (viz příloha 31). Proto bylo provedeno srovnání s naměřenými daty pouze u těchto mechanických vlastností (mez pevnosti v tahu a tvrdost) (viz přílohy 17, 20), u ostatních veličin (tažnost, modul pružnosti v tahu) byly určeny základní statistické parametry (viz přílohy 18, 19).

Materiál SG 2000 + Al pojivo vykazoval nízké hodnoty mechanických parametrů (viz přílohy 21 až 24), hlavním problémem byla velká pórovitost materiálu.

U materiálu SG 145 byla známa pouze hodnota tvrdosti udávaná výrobcem (viz příloha 32), u které bylo provedeno srovnání s naměřenými hodnotami. Statistické vyhodnocení bylo stejné jako u předchozích typů materiálů (viz příloha 25 až 28).

Textura povrchu byla hodnocena pouze pro materiály používané pro 3D tisk jako ABS (viz kap 4.1.8), PLA (viz příloha 5) a nylon (viz příloha 16). Pro materiály PLA a nylon platí podobné závěry jako pro materiál ABS.

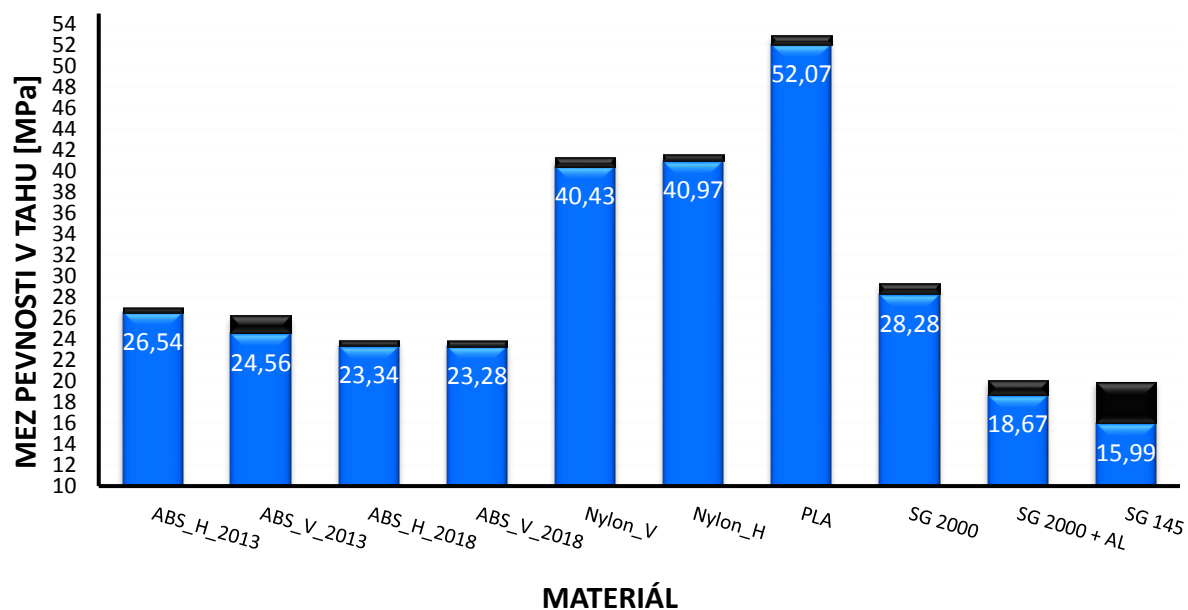
## 5 DISKUSE K DOSAŽENÝM VÝSLEDKŮM

Tato kapitola se zabývá celkovým zhodnocením dosažených výsledků a porovnáním jednotlivých materiálů. V tabulce (viz tab. 5.1) jsou uvedeny spodní hodnoty 95% intervalu spolehlivosti. Pokud se tedy zvolí hodnota pro daný materiál z této tabulky, bude na 95 % odpovídat skutečné hodnotě.

Tab. 5.1 Shrnutí mechanických vlastností.

Materiál	Rm [MPa]	E [GPa]	At [%]	Tvrdost [HShD]
ABS_H_2013	26,54	1,27	3,77	72,48
ABS_V_2013	24,56	1,03	3,82	
ABS_H_2018	23,34	0,79	4,48	
ABS_V_2018	23,28	1,16	4,49	
Nylon_V	40,43	0,92	14,76	71,96
Nylon_H	40,97	0,94	30,25	
PLA	52,07	1,37	4,19	80,38
SG 2000	28,28	0,82	5,10	70,04
SG 2000 + AL	18,67	1,30	1,35	70,74
SG 145	15,99	0,56	3,67	65,94

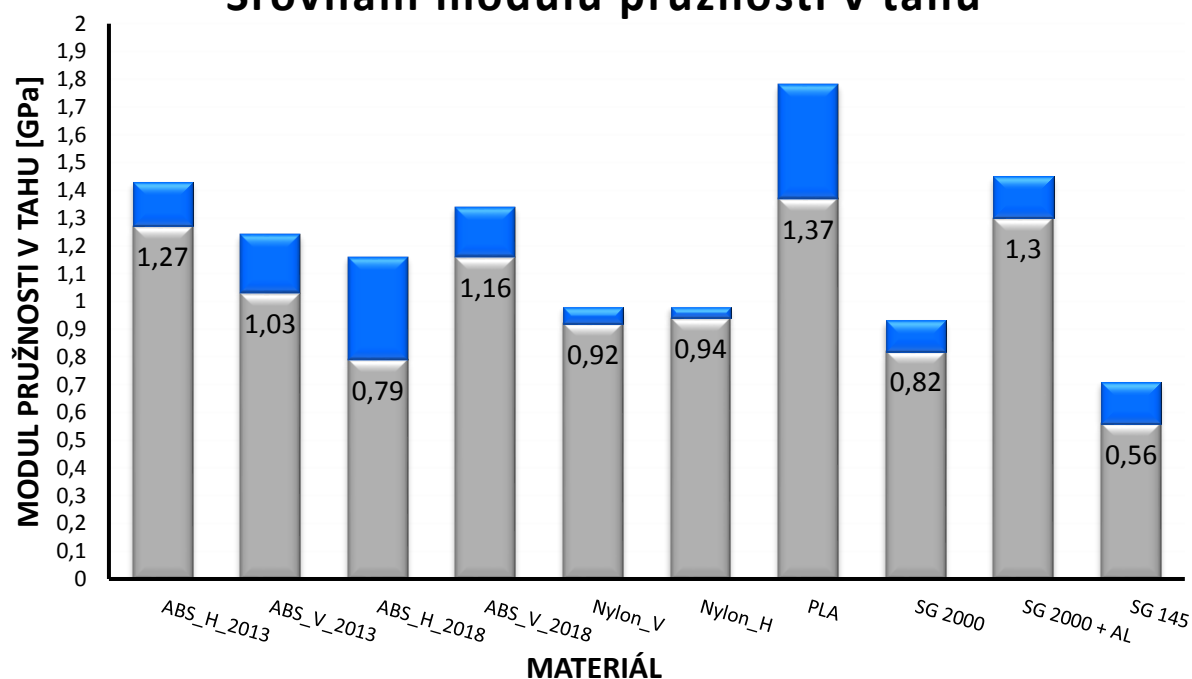
## Srovnání meze pevnosti v tahu



Obr. 5.1 Grafické srovnání meze pevnosti v tahu pro jednotlivé materiály.

V grafické závislosti (viz obr. 5.1) jsou černou barvou znázorněny 95% intervaly spolehlivosti. Čísla uvedená v jednotlivých sloupcích udávají spodní hodnoty 95% intervalu spolehlivosti. Z grafické závislosti vyplývá, že nejvyšší hodnoty meze pevnosti dosahuje materiál PLA a naopak nejnižší hodnoty materiál SG 145. Z hlediska pevnosti je tedy nejvhodnější volit materiál PLA.

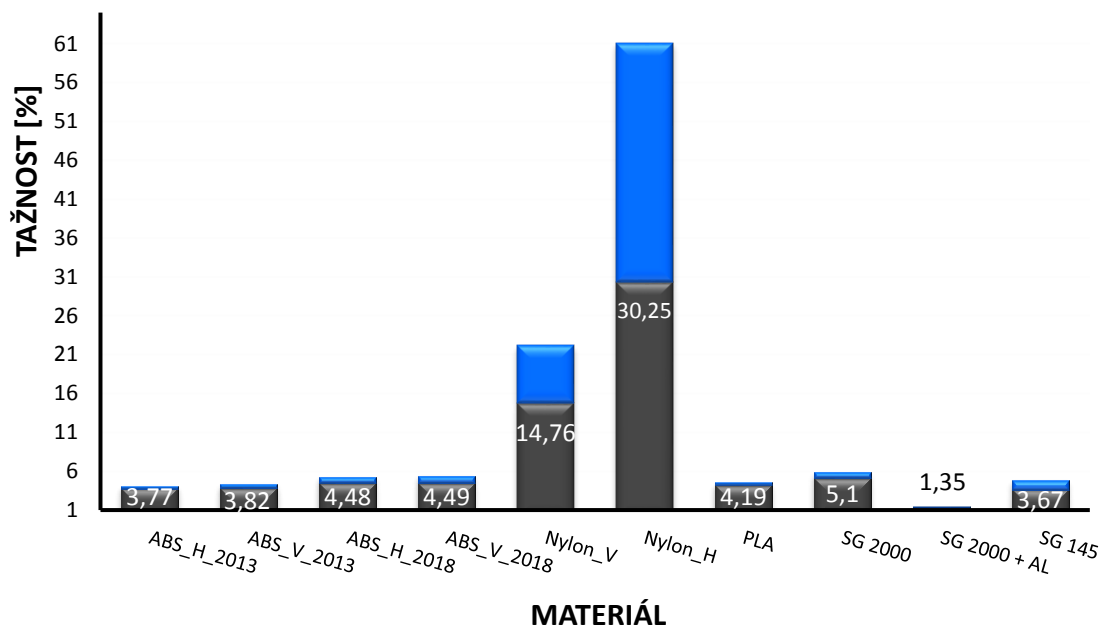
## Srovnání modulu pružnosti v tahu



Obr. 5.2 Grafické srovnání modulu pružnosti v tahu pro jednotlivé materiály.

Modrá barva v grafické závislosti (viz obr. 5.2) znázorňuje 95% interval spolehlivosti. Z grafické závislosti je patrné, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti dosahuje materiál PLA.

### Srovnání tažnosti u jednotlivých materiálů



Obr. 5.3 Grafické srovnání tažnosti pro jednotlivé materiály.

Z grafické závislosti (viz obr. 5.3), kde modrá barva znázorňuje 95% interval spolehlivosti je patrné, že nejvyšší hodnota tažnosti byla dosažena u materiálu Nylon\_H a nejmenší u SG 2000 + Al.

Z celkového hodnocení vyplývá, že materiál s největší hodnotou meze pevnosti je materiál PLA. Zároveň je také zřejmé, že materiál vhodný z hlediska tažnosti je nylon tisknutý horizontálně.

Na materiálu ABS je zřejmý rozdíl vzhledem k jeho datu výroby. Materiál ABS s novějším datem vykazuje vyšší hodnoty tažnosti než materiál starší. Proto se doporučuje, pokud je cílem tisků pružný model, používat co nejnovější materiál. Starší materiál však vykazuje vyšší hodnoty pevnosti, ale je to na úkor tažnosti.

Obecně se doporučuje tisknout modely tak, aby směr zatěžování byl totožný se směrem kladení vrstev (horizontální tisk).

V tabulce (viz tab. 5.2) je uvedeno procentuální srovnání naměřených hodnot a hodnot udávaných výrobcem. Záporné hodnoty znázorňují pokles vzhledem k hodnotám udávaným výrobcem (hodnota udávaná výrobcem je počítána jako 100 %), kladné hodnoty naopak znázorňují nárůst. Porovnání bylo provedeno pro materiály a parametry, u kterých byla známá referenční hodnota.

Tab. 5.2 Procentuální srovnání naměřených hodnot a hodnot udávaných výrobcem.

<b>Materiál</b>	<b>Rm [%]</b>	<b>E [%]</b>	<b>At [%]</b>
<b>ABS_H_2013</b>	<b>-17,1</b>	<b>-43,0</b>	<b>-46,1</b>
<b>ABS_V_2013</b>	<b>-5,5</b>	<b>-52,8</b>	<b>91,0</b>
<b>ABS_H_2018</b>	<b>-27,1</b>	<b>-64,6</b>	<b>-36,0</b>
<b>ABS_V_2018</b>	<b>-10,5</b>	<b>-46,8</b>	<b>124,5</b>
<b>Nylon_V</b>	<b>-15,8</b>	<b>-19,2</b>	<b>173,3</b>
<b>Nylon_H</b>	<b>-22,7</b>	<b>-28,2</b>	<b>218,4</b>
<b>SG 2000</b>	<b>-29,3</b>	<b>X</b>	<b>X</b>



## ZÁVĚR

V této práci je řešena problematika stanovení mechanických vlastností vybraných materiálů (ABS, nylon a PLA) používaných pro 3D tisk. První kapitola této práce obsahuje teoretický rozbor mechanických zkoušek. V této části jsou také popsány jednotlivé parametry posuzované v následujících kapitolách. Součástí této kapitoly je i rozbor a porovnání plastových materiálů. Druhá část je zaměřena na problematiku technologií 3D tisku. V této části jsou popsány vybrané metody a také jejich výhody a nevýhody. Třetí kapitola je zaměřena na experimentální část, ve které je popsán proces zhotovení zkušebních vzorků až po provedení jednotlivých mechanických zkoušek. Mezi provedené mechanické zkoušky patří zkouška tahem, zkouška tvrdosti Shore a vyhodnocení povrchu vzniklého technologií 3D tisku. V rámci této kapitoly je navíc, oproti tématu této práce, popsán i postup stanovení mechanických vlastností vzorků zhotovených technologií Soft Tooling. Čtvrtá kapitola se zabývá statistickým vyhodnocením naměřených dat materiálu ABS. Bylo provedeno vyhodnocení pro vybrané mechanické parametry, které byly získané v rámci mechanických zkoušek (mez pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu, tažnost a tvrdost). Vyhodnocení ostatních druhů materiálů, které bylo provedeno stejným způsobem, je uvedeno v rámci příloh. Poslední kapitola se zabývá celkovým zhodnocením mechanických parametrů. Určené parametry jsou přehledně uspořádány v tabulce (viz tab. 5.1). Dále jsou zde uvedeny grafické závislosti porovnání mechanických parametrů a jejich slovní ohodnocení.

Shrnutí dosažených výsledků:

- byly stanoveny mechanické parametry pro jednotlivé materiály,
- výsledné mechanické parametry byly srovnány s hodnotami udávanými výrobcem a byl vypočten procentuální rozdíl (viz tab. 5.2),
- u materiálů byly určeny mechanické parametry, které výrobce neudává,
- byly stanoveny 95% intervaly spolehlivosti,
- byl určen rozdíl mezi jednotlivými druhy tisku (horizontální vs. vertikální) a bylo doporučeno, že vzhledem k mechanickým vlastnostem je vhodné používat (ve směru největšího namáhání) horizontální tisk,
- u materiálu ABS byl stanoven rozdíl v hodnotách mechanických parametrů pro materiály s rozdílným datem výroby,
- byly stanoveny hodnoty struktury povrchu pro dané podmínky.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle diplomové práce byly splněny.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. DRÁPELA, M. Modul Rapid Prototyping. Centrum vzdělávání a poradenství Vysokého učení technického v Brně, 44 s.
2. KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
3. The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. *Scuplteo* [online]. 14. prosince 2016 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>.
4. MORAVČÍK, Roman. *Úvod do materiálového inženýrství I*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015. Edícia vysokoškolských učebnic (Slovenská technická univerzita). ISBN 978-80-227-4405-8.
5. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4
6. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-704-3417-1.
7. SILBERNAGEL, Arnošt. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. Ostrava: Kovosil, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7.
8. KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
9. DLUHOŠ, Jindřich. *Materiály a technologie: Plasty a vybrané nekovové materiály : Určeno stud. denního studia, studia při zaměstnání a postgraduál. studia*. 2. vyd. Ostrava: Ostravská univerzita, 1994. ISBN 80-7042-073-1.
10. FIALA, Jaroslav a Ivo KRAUS. *Povrchy a rozhraní*. 2. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05881-7.
11. DUDAREV, Ivan. *Hodnocení jakosti povrchu z hlediska funkčních vlastností: osnova závěrečné zprávy projektu č. FSI-J-10-57*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-721-5.
12. EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.

13. MOHYLA, Miroslav. *Strojírenské materiály I*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0270-8.
14. MACEK, Karel. *Nauka o materiálu*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2543-8.
15. PATA, Vladimír. *Moderní způsoby hodnocení drsnosti strojírenských povrchů na bázi matematické statistiky: Modern ways of assessing the roughness of engineering surfaces based on mathematical statistics : teze přednášek ke jmenování profesorem*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019. ISBN 978-80-7454-829-1.
16. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Vyd. 2. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-720-4130-4.
17. KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. *3D tisk*. Přeložil Petra MILLAROVÁ. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
18. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
19. CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010, 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.
20. REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.
21. Laminated object manufacturing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated\\_object\\_manufacturing](https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing)
22. Rychlá výroba prototypů. *F1NEWS* [online]. Zář 2013 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://f1news.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypu-klic-k-intenzivnim-aerodynamickym-programum-v-f1-video>
23. Stereolithography Process. *C3 plastic design* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.c3plasticdesign.co.uk/stereolithography-process.html>
24. Přehled technologií 3D tisku: SELECTIVE LASER SINTERING (SLS). In: *Dk metal prominent* [online]. Nový Jičín, 2012, 9.01.2018 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>

25. ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. 1. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2012.
26. ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 1: Obecné principy*. 1. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2012.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
<b>2D</b>	Dvourozměrný
<b>3D</b>	Trojdimenzionální (trojrozměrný)
<b>ABS</b>	Akrylonitrilbutadienstyren
<b>ČSN EN ISO</b>	Česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou normu identickou s mezinárodní normou ISO
<b>DMLS</b>	Direct Metal Laser Sintering
<b>FDM</b>	Fused Deposition Modeling
<b>FSI</b>	Fakulta strojního inženýrství
<b>GMT</b>	Glass-Mat Thermoplastic
<b>HRA</b>	Tvrдость dle Rockwella
<b>HRB</b>	Tvrдость dle Rockwella
<b>HRC</b>	Tvrдость dle Rockwella
<b>LFT</b>	Long Fiber Thermoplastic
<b>LOM</b>	Laminated Object Manufacturing
<b>MJM</b>	Multi Jet Modeling
<b>Např.</b>	Například
<b>Obr.</b>	Obrázek
<b>PA</b>	Polyamidy
<b>PC</b>	Polykarbonát
<b>PE</b>	Polyethylen
<b>PLA</b>	Polylactic acid
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PS</b>	Polystyren
<b>PVC</b>	Polyvinylchlorid
<b>RepRap</b>	Replicating Rapid Prototyper
<b>SGC</b>	Solid Ground Cutting
<b>SLA</b>	Stereo Litography Apparatus
<b>SLS</b>	Selective Laser Sintering
<b>STL</b>	Stereolitografie
<b>Tab.</b>	Tabulka

<b>UV</b>	Ultrafialové záření
<b>Vs.</b>	Versus

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>A</b>	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha vtisku
<b>A</b>	[%]	Tažnost
<b>A<sub>g</sub></b>	[%]	Homogenní tažnost
<b>A<sub>t</sub></b>	[%]	Tažnost měřená v zatíženém stavu pod napětím
<b>A<sub>11,3</sub></b>	[%]	Tažnost pro dlouhé zkušební tyče
<b>D</b>	[mm]	Průměr indentoru
<b>E</b>	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
<b>F</b>	[N]	Zatěžující síla
<b>F<sub>e</sub></b>	[N]	Síla na mezi kluzu
<b>F<sub>eD</sub></b>	[N]	Síla na dolní mezi kluzu
<b>F<sub>eH</sub></b>	[N]	Síla na horní mezi kluzu
<b>F<sub>m</sub></b>	[N]	Síla na mezi pevnosti
<b>F<sub>p0,2</sub></b>	[N]	Síla na nevýrazné mezi kluzu
<b>HB</b>	[HB]	Tvrdost dle Brinella
<b>HV</b>	[HV]	Tvrdost dle Vickerse
<b>L</b>	[mm]	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi
<b>L<sub>c</sub></b>	[mm]	Zkušební délka tyče
<b>L<sub>g</sub></b>	[mm]	Maximální rovnoměrná deformace zvolené měřené délky tyče při dosažení maximální zatěžující síly
<b>L<sub>0</sub></b>	[mm]	Výchozí délka
<b>L<sub>t</sub></b>	[mm]	Celková délka tyče
<b>L<sub>u</sub></b>	[mm]	Konečná délka
<b>R</b>	[MPa]	Smluvní napětí
<b>R<sub>a</sub></b>	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti
<b>R<sub>e</sub></b>	[MPa]	Výrazná mez kluzu

$R_{eD}$	[MPa]	Dolní mez kluzu
$R_{eH}$	[MPa]	Horní mez kluzu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$R_p$	[ $\mu\text{m}$ ]	Maximální výška profilu drsnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Nevýrazná mez kluzu
$R_q$	[ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti
$R_v$	[ $\mu\text{m}$ ]	Maximální hloubka profilu drsnosti
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	Největší výška profilu drsnosti
$S$	[ $\text{mm}^2$ ]	Aktuální průřez vzorku
$S_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná aritmetická úchylka povrchu
$S_q$	[ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná kvadratická úchylka povrchu
$S_t$	[ $\mu\text{m}$ ]	Celková výška povrchu
$S_u$	[ $\text{mm}^2$ ]	Konečný průřez
$S_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	Výška z deseti bodů povrchu
$S_0$	[ $\text{mm}^2$ ]	Průřez zkušební tyče
$V$	[%]	Koeficient variace
$W_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti
$W_q$	[ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti
$W_t$	[ $\mu\text{m}$ ]	Celková výška profilu vlnitosti
$W_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	Největší výška profilu vlnitosti
$Z$	[%]	Kontrakce
$a$	[mm]	Tloušťka tyče
$b$	[mm]	Šířka tyče
$b_1$	[mm]	Šířka zúžené části
$b_2$	[mm]	Šířka konců
$d_0$	[mm]	Průměr tyče
$h$	[mm]	Tloušťka
$l$	[mm]	Základní délka
$L$	[mm]	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi

$l_1$	[mm]	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami
$l_2$	[mm]	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami
$l_3$	[mm]	Celková délka
$n$	[-]	Počet prvků profilu
$r$	[mm]	Poloměr
$x$	[mm]	Úsečka profilu odečtená na střední čáře
$\bar{x}$	[-]	Aritmetický průměr
$x_i$	[-]	Prvek statistického souboru o indexu $i$
$y_i$	[-]	Souřadnice $n$ bodů profilu
$s$	[-]	Směrodatná odchylka
$s_{\bar{x}}$	[-]	Střední chyba průměru
$s^2$	[-]	Rozptyl
$y(x)$	[-]	Funkce popisující profil
$\varepsilon$	[-]	Relativní prodloužení
$\varepsilon_g$	[-]	Maximální rovnoměrná poměrná deformace
$\varepsilon_u$	[-]	Konečné poměrné prodloužení
$\varphi_k$	[°]	Úhel, při kterém dojde k prohnutí hrotu
$\Delta L_g$	[mm]	Přírůstek měřené délky při dosažení maximální rovnoměrné deformace
$\Delta L_u$	[mm]	Absolutní přírůstek počáteční délky po přetržení
$\Delta L$	[mm]	Změna délky zkušební vzorku
$\Delta S$	[mm <sup>2</sup> ]	Rozdíl počátečního a konečného průřezu



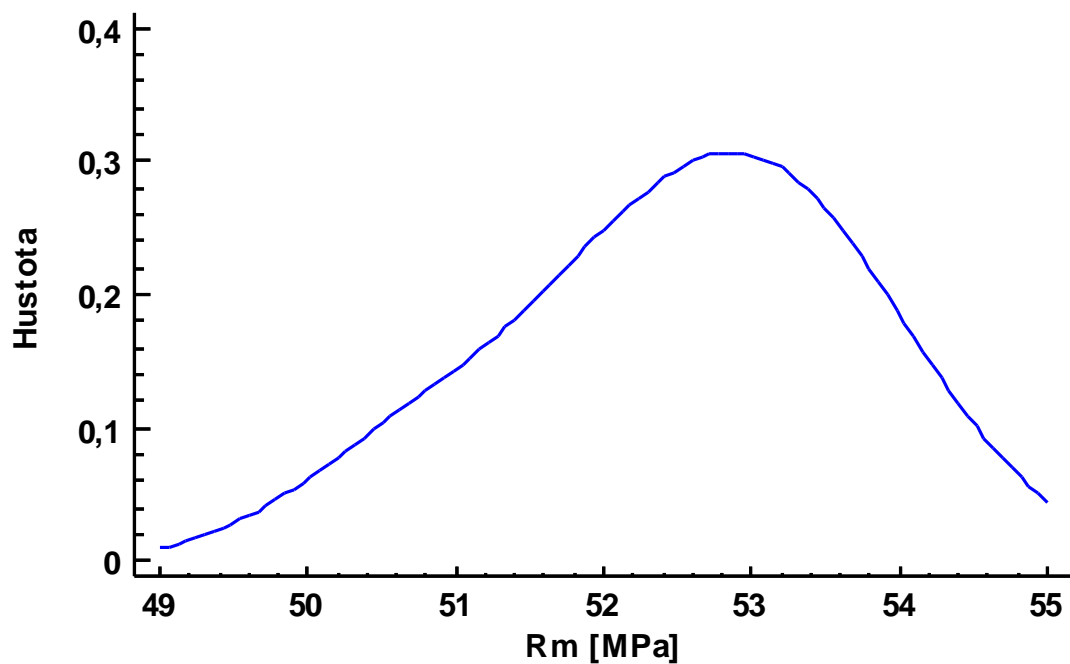
**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Statistické zhodnocení meze pevnosti u materiálu PLA.
Příloha 2	Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu PLA.
Příloha 3	Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu PLA.
Příloha 4	Vyhodnocení tvrdosti u materiálu PLA.
Příloha 5	Parametry textury povrchu materiálu PLA.
Příloha 6	Statistické zhodnocení meze pevnosti v tahu u materiálu nylon tisknutého vertikálně.
Příloha 7	Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu nylon tisknutého vertikálně.
Příloha 8	Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu nylon tisknutého vertikálně.
Příloha 9	Statistické zhodnocení meze pevnosti v tahu u materiálu nylon tisknutého horizontálně.
Příloha 10	Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu nylon tisknutého horizontálně.
Příloha 11	Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu nylon tisknutého horizontálně.
Příloha 12	Porovnání meze pevnosti v tahu pro materiál nylon tisknutý horizontálně vs. vertikálně.
Příloha 13	Porovnání modulu pružnosti pro materiál nylon tisknutý horizontálně vs. vertikálně.
Příloha 14	Porovnání tažností pro materiál nylon tisknutý horizontálně vs. vertikálně.
Příloha 15	Vyhodnocení tvrdosti u materiálu nylon.
Příloha 16	Parametry textury povrchu materiálu nylon.
Příloha 17	Statistické zhodnocení meze pevnosti u materiálu SG 2000.
Příloha 18	Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu SG 2000.
Příloha 19	Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu SG 2000.
Příloha 20	Vyhodnocení tvrdosti u materiálu SG 2000.
Příloha 21	Statistické zhodnocení meze pevnosti u materiálu SG 2000 + Al pojivo.
Příloha 22	Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu SG 2000 + Al pojivo.
Příloha 23	Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu SG 2000 + Al pojivo.
Příloha 24	Vyhodnocení tvrdosti u materiálu SG 2000 + Al pojivo.
Příloha 25	Statistické zhodnocení meze pevnosti u materiálu SG 145.
Příloha 26	Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu SG 145.
Příloha 27	Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu SG 145.
Příloha 28	Vyhodnocení tvrdosti u materiálu SG 145.
Příloha 29	Materiálový list pro materiál ABS.
Příloha 30	Materiálový list pro materiál nylon.
Příloha 31	Materiálový list pro materiál SG 2000.
Příloha 32	Materiálový list pro materiál SG 145.

## PŘÍLOHA 1

Statistické zhodnocení meze pevnosti u materiálu PLA.

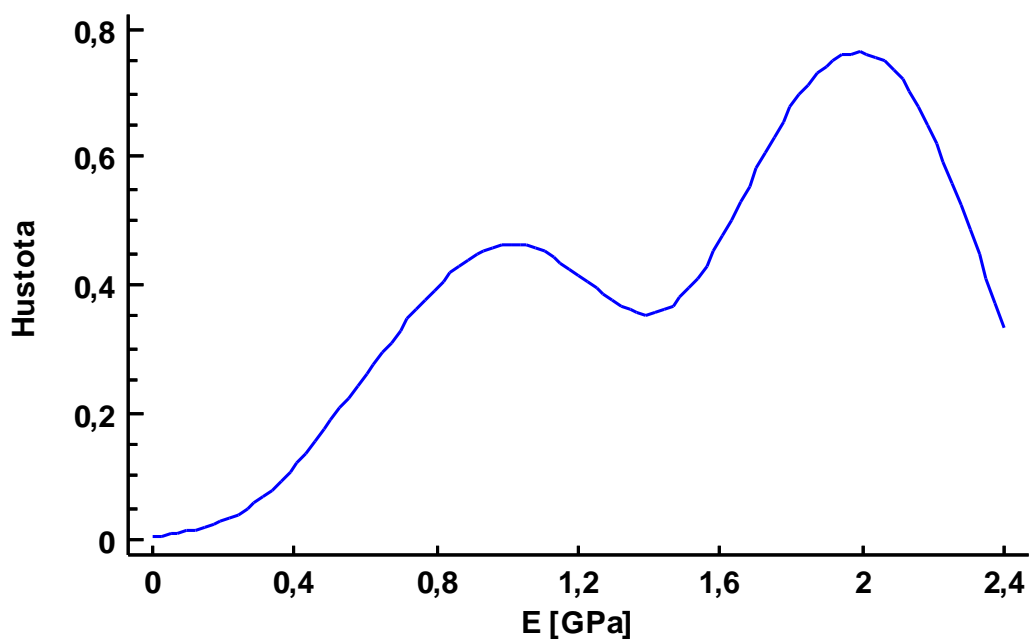
Parametry	Hodnoty
Průměr	52,5148 MPa
Medián	52,6927 MPa
Rozptyl	1,2975
Směrodatná odchylka	1,1391
Variační koeficient	2,1691 %
Střední chyba průměru	0,2153
Minimální hodnota	49,9382 MPa
Maximální hodnota	54,4913 MPa



## PŘÍLOHA 2

Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu PLA.

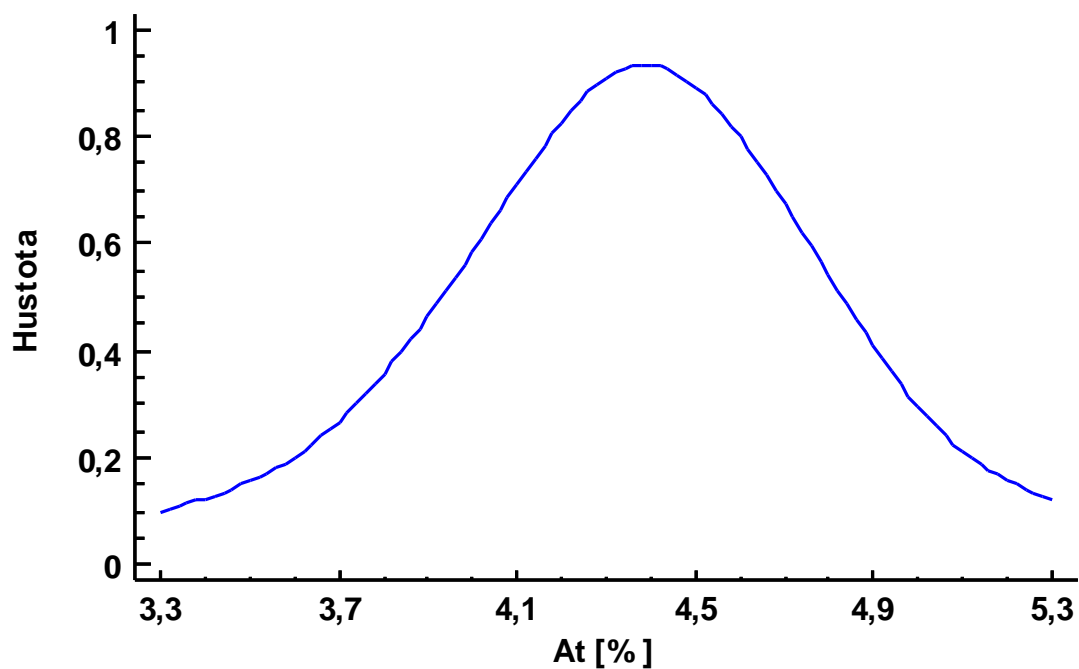
Parametry	Hodnoty
Průměr	1,5769 GPa
Medián	1,8635 GPa
Rozptyl	0,2773
Směrodatná odchylka	0,5266
Variační koeficient	33,3956 %
Střední chyba průměru	0,0995
Minimální hodnota	0,5541 GPa
Maximální hodnota	2,1658 GPa



### PŘÍLOHA 3

Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu PLA.

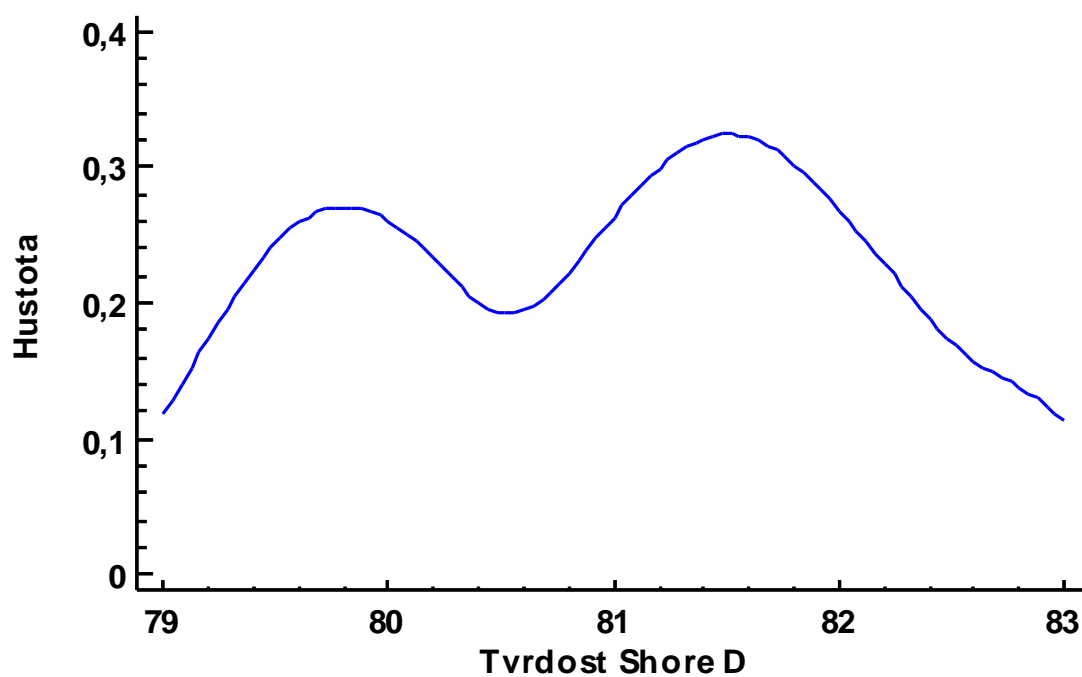
Parametry	Hodnoty
Průměr	4,3537 %
Medián	4,3888 %
Rozptyl	0,1715
Směrodatná odchylka	0,4141
Variační koeficient	9,5111 %
Střední chyba průměru	0,0783
Minimální hodnota	3,3666 %
Maximální hodnota	5,1484 %



## PŘÍLOHA 4

Vyhodnocení tvrdosti u materiálu PLA.

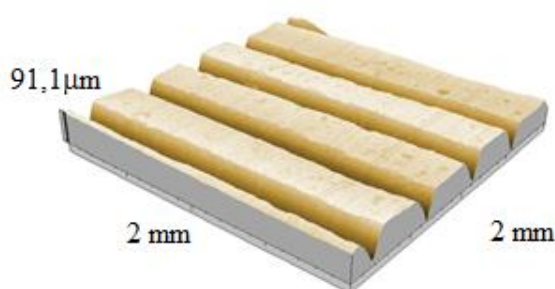
Parametry	Hodnoty
Průměr	81,0067
Medián	81,4000
Rozptyl	1,2949
Směrodatná odchylka	1,1379
Variační koeficient	1,4048 %
Střední chyba průměru	0,2938
Minimální hodnota	79,4000
Maximální hodnota	82,8000



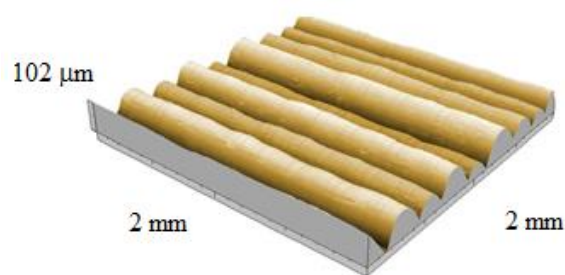
## PŘÍLOHA 5

Parametry textury povrchu materiálu PLA.

Parametry	Název	Hodnota [ $\mu\text{m}$ ]	
		Horní strana	Boční strana
$S_a$	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	17,4	20,7
$S_q$	Průměrná kvadratická úchylka povrchu	22,3	24,7
$S_t$	Celková výška povrchu	91,1	102
$S_z$	Výška z deseti bodů povrchu	90,8	102

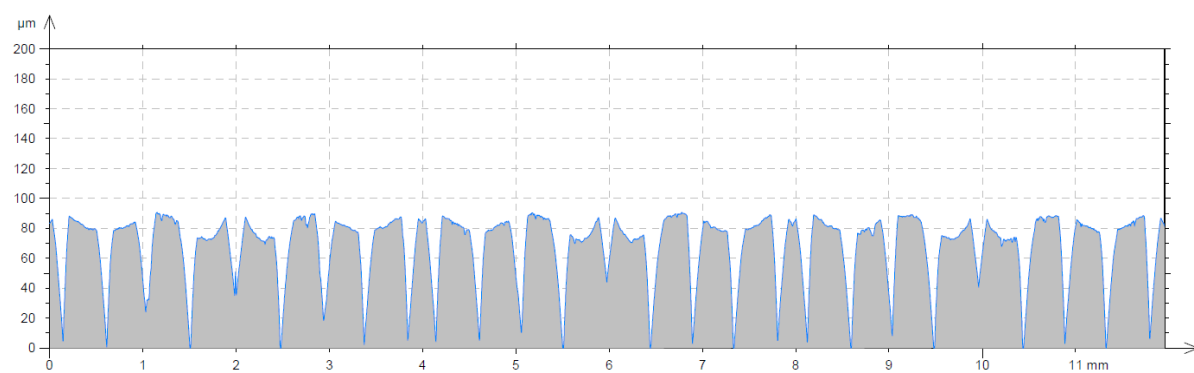


Horní strana.

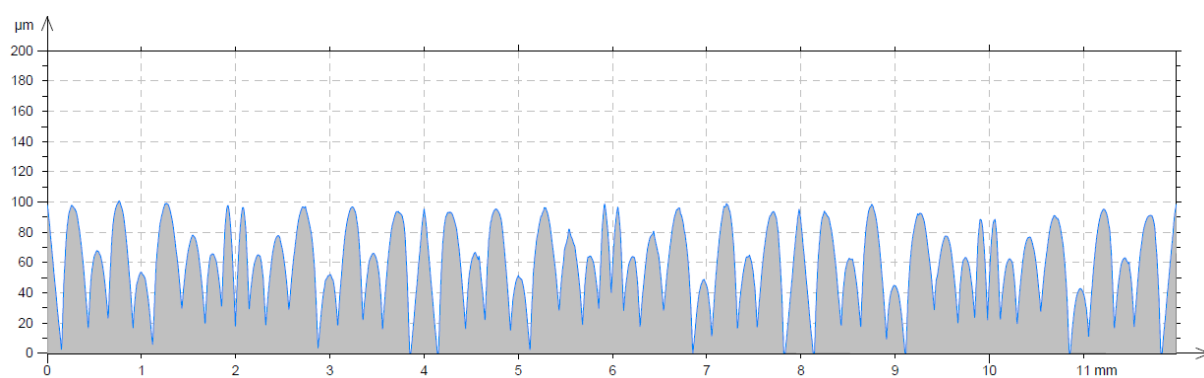


Boční strana.

Parametry		Název	Hodnota [ $\mu\text{m}$ ]	
			Horní strana	Boční strana
Drsnost	$R_a$	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	16,1	18,8
	$R_q$	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	20,7	22,5
	$R_t$	Celková výška profilu drsnosti	87,2	99,4
	$R_z$	Největší výška profilu drsnosti	80,6	86,6
Vlnitost	$W_a$	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	3,2	3,4
	$W_q$	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	3,7	4,1
	$W_t$	Celková výška profilu vlnitosti	13,8	18,1
	$W_z$	Největší výška profilu vlnitosti	11,1	11,5



Horní strana.

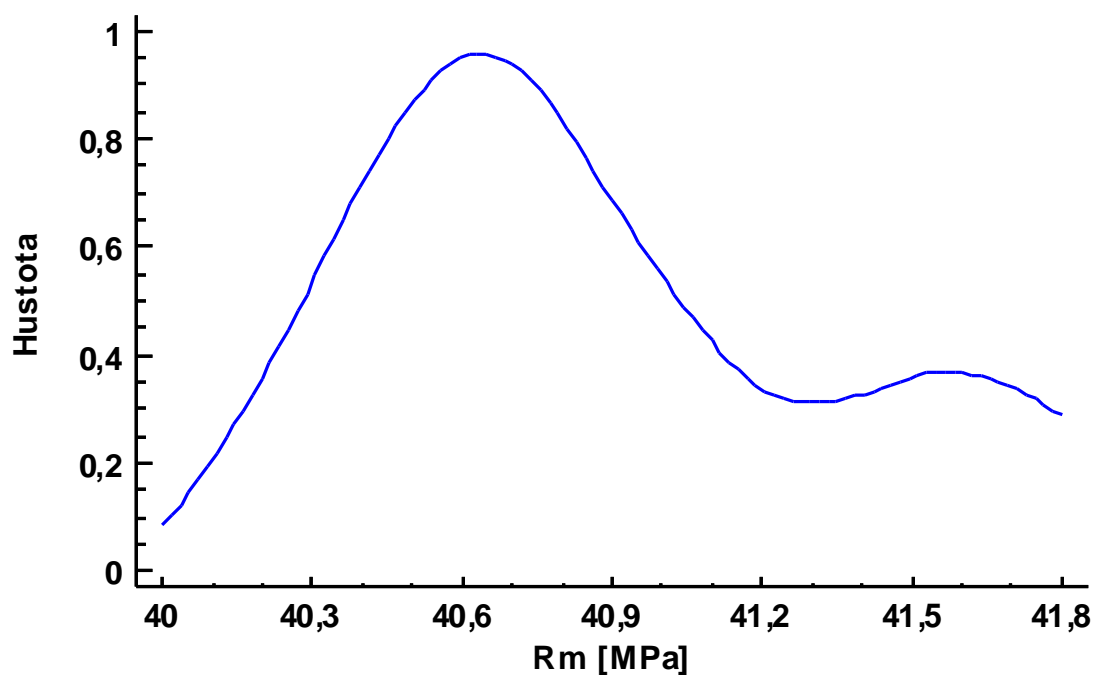


Boční strana.

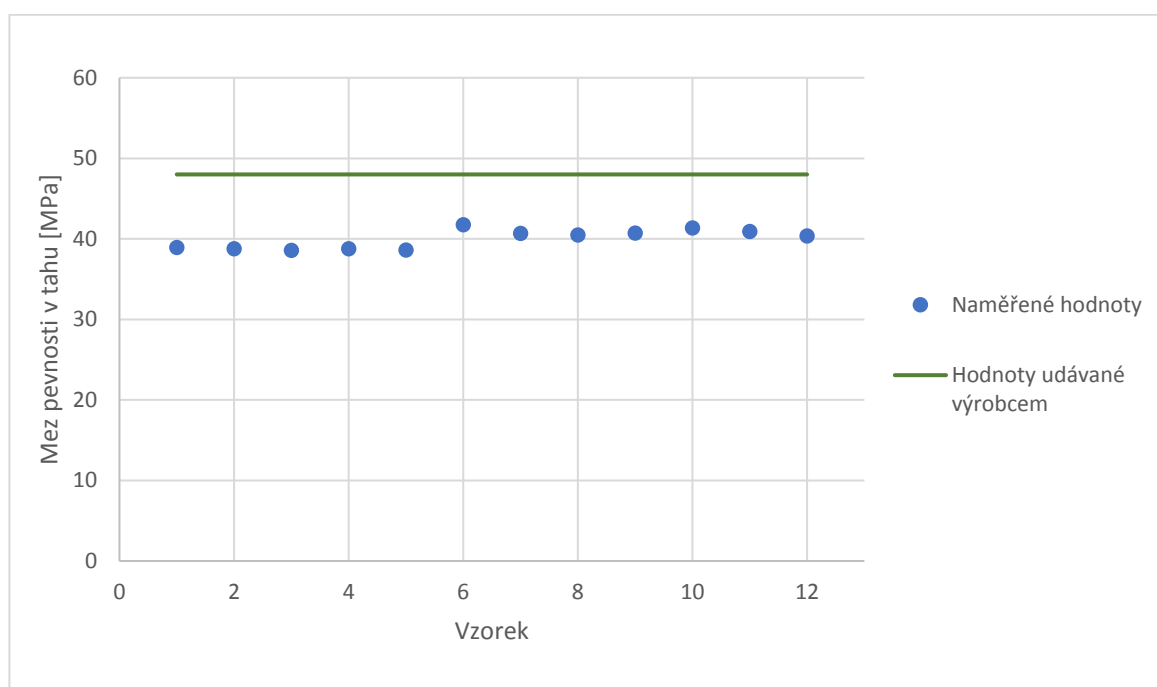
## PŘÍLOHA 6

Statistické zhodnocení meze pevnosti v tahu u materiálu nylon tisknutého vertikálně.

Parametry	Hodnoty
Průměr	40,8986 MPa
Medián	40,7317 MPa
Rozptyl	0,2563
Směrodatná odchylka	0,5063
Variační koeficient	1,2380 %
Střední chyba průměru	0,1914
Minimální hodnota	40,3502 MPa
Maximální hodnota	41,7705 MPa



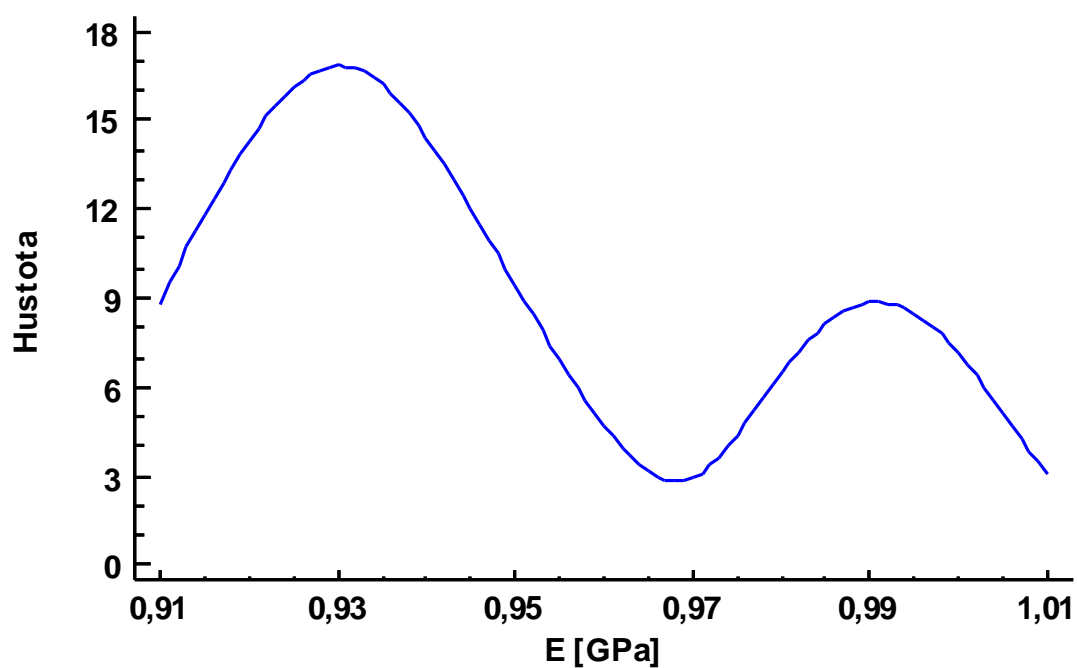


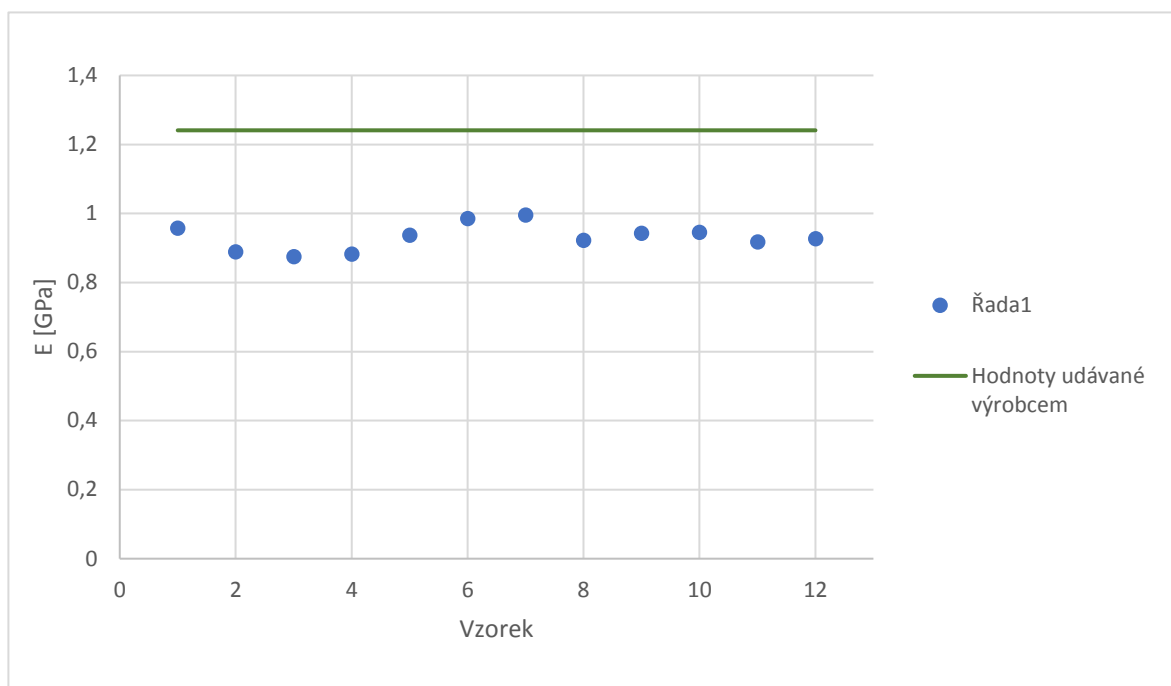


## PŘÍLOHA 7

Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu nylon tisknutého vertikálně.

Parametry	Hodnoty
Průměr	0,9483 GPa
Medián	0,9432 GPa
Rozptyl	0,0010
Směrodatná odchylka	0,0310
Variační koeficient	3,2664 %
Střední chyba průměru	0,0117
Minimální hodnota	0,9175 GPa
Maximální hodnota	0,9960 GPa

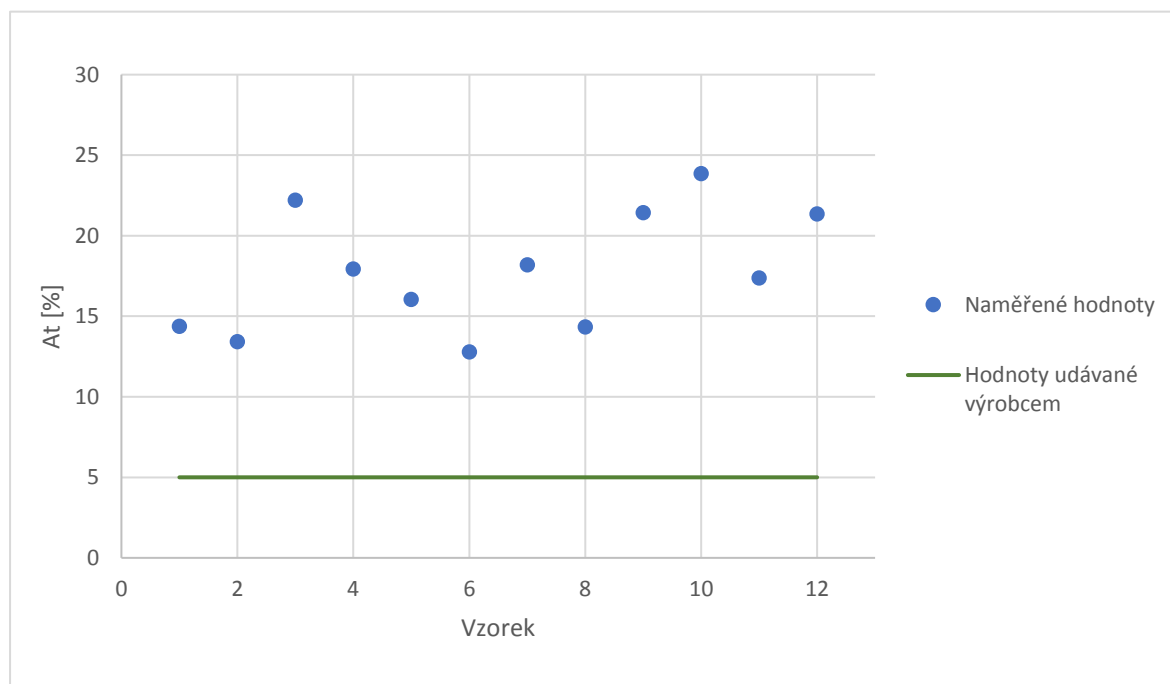




## PŘÍLOHA 8

Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu nylon tisknutého vertikálně.

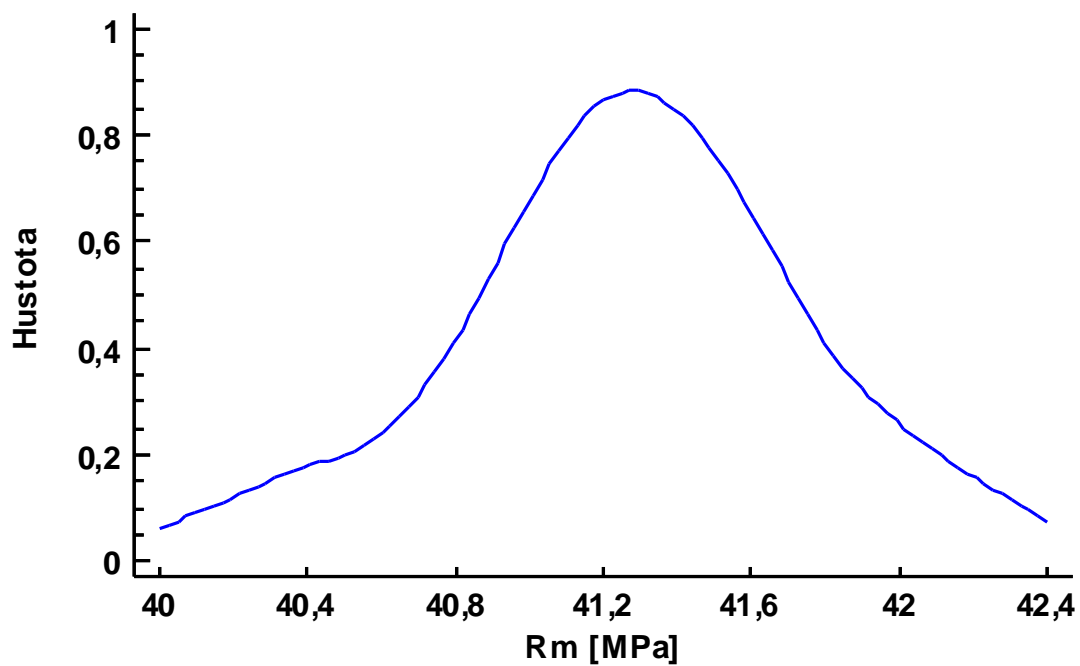
Parametry	Hodnoty
Průměr	18,4766 %
Medián	18,1944 %
Rozptyl	16,1138
Směrodatná odchylka	4,0142
Variační koeficient	21,7259 %
Střední chyba průměru	1,5172
Minimální hodnota	12,7842 %
Maximální hodnota	23,8525 %

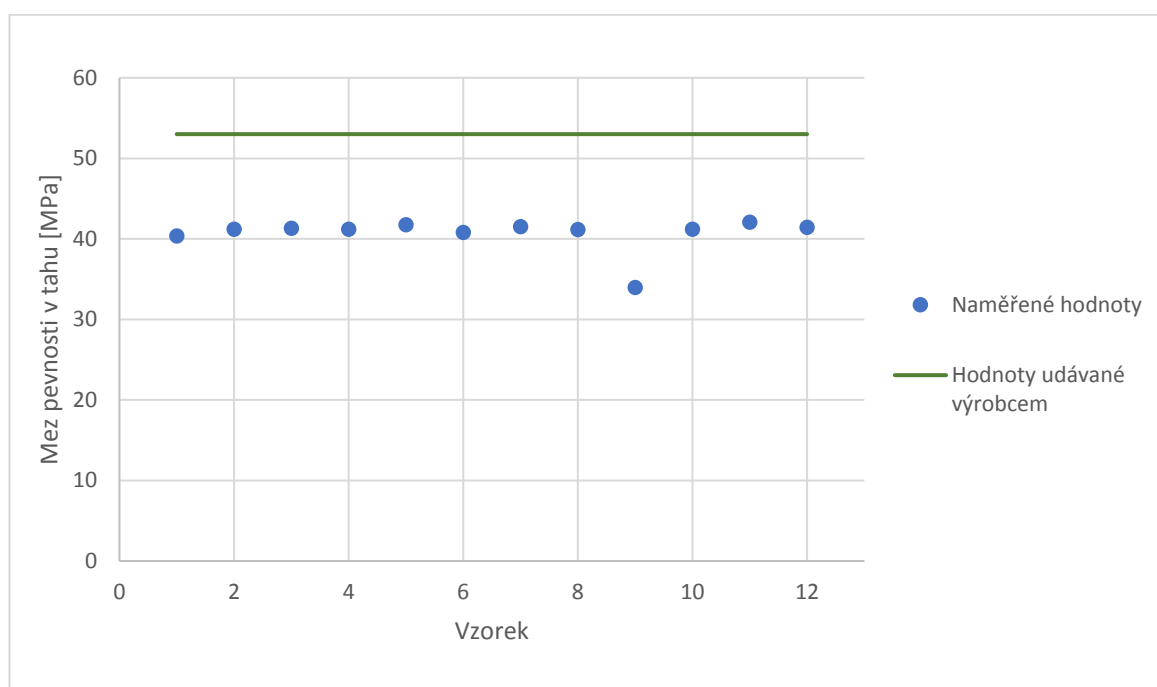


## PŘÍLOHA 9

Statistické zhodnocení meze pevnosti v tahu u materiálu nylon tisknutého horizontálně.

Parametry	Hodnoty
Průměr	41,2716 MPa
Medián	41,2058 MPa
Rozptyl	0,2055
Směrodatná odchylka	0,4533
Variační koeficient	1,0984 %
Střední chyba průměru	0,1367
Minimální hodnota	40,3575 MPa
Maximální hodnota	42,0735 MPa

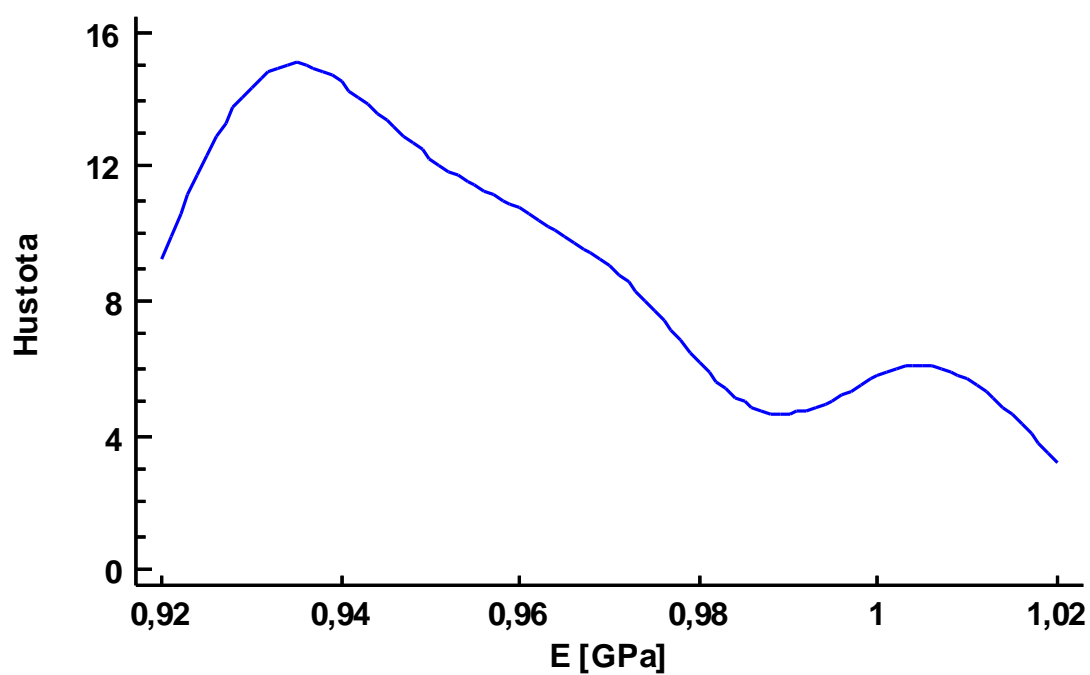


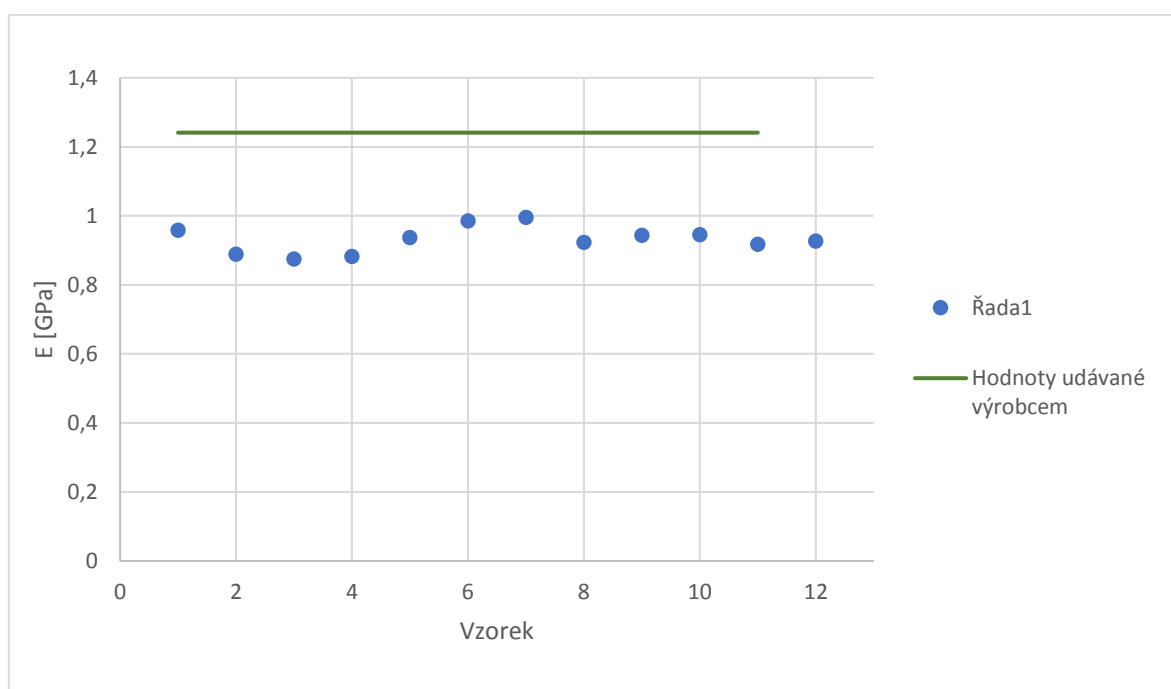


## PŘÍLOHA 10

Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu nylon tisknutého horizontálně.

Parametry	Hodnoty
Průměr	0,9572 GPa
Medián	0,9501 GPa
Rozptyl	0,0009
Směrodatná odchylka	0,0295
Variační koeficient	3,0790 %
Střední chyba průměru	0,0093
Minimální hodnota	0,9241 GPa
Maximální hodnota	1,0101 GPa



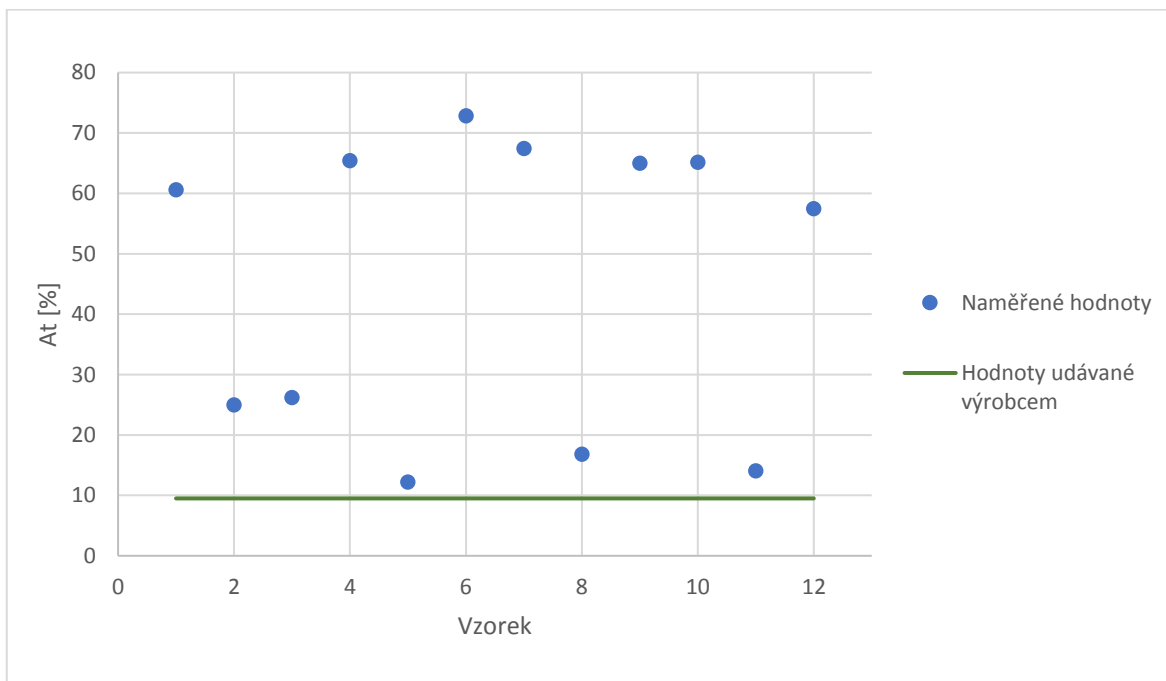




## PŘÍLOHA 11

Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu nylon tisknutého horizontálně.

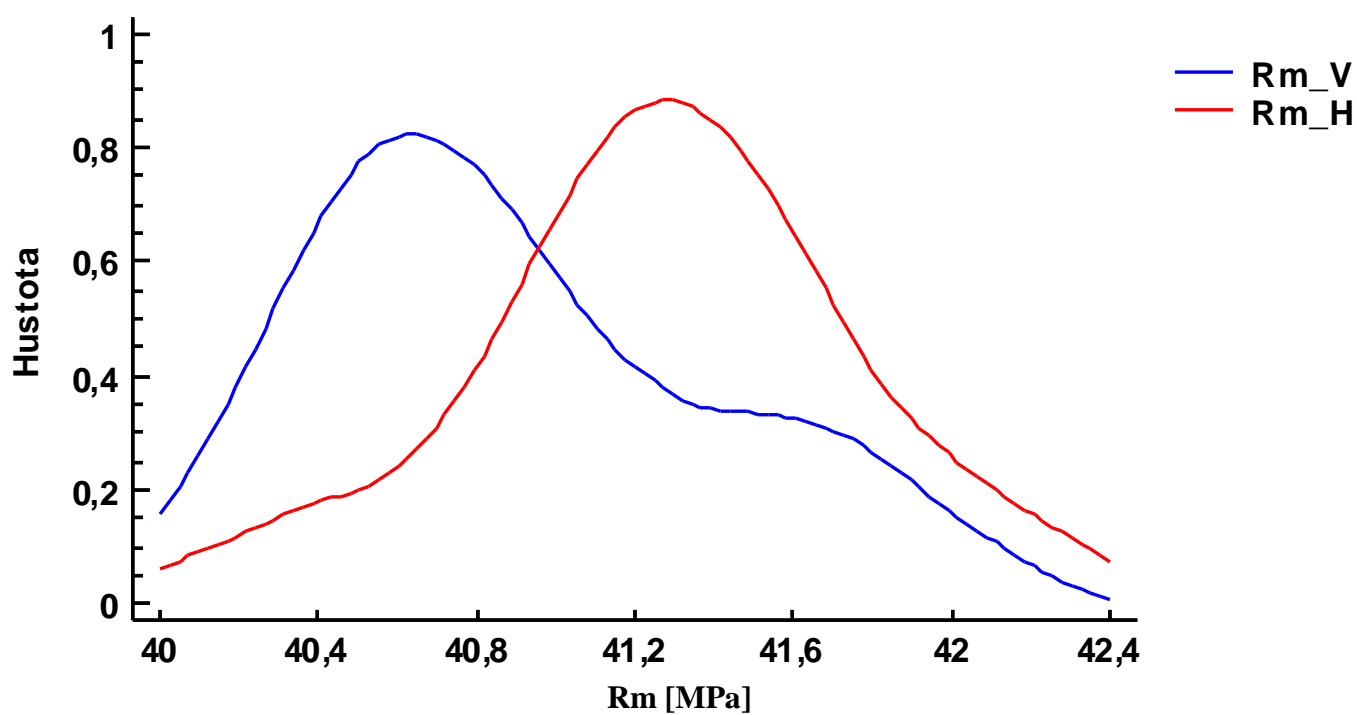
Parametry	Hodnoty
Průměr	45,6630 %
Medián	59,0151 %
Rozptyl	588,4590
Směrodatná odchylka	24,2582
Variační koeficient	53,1244 %
Střední chyba průměru	7,0027
Minimální hodnota	12,1951 %
Maximální hodnota	72,8363 %



## PŘÍLOHA 12

Porovnání meze pevnosti v tahu pro materiál nylon tisknutý horizontálně vs. vertikálně.

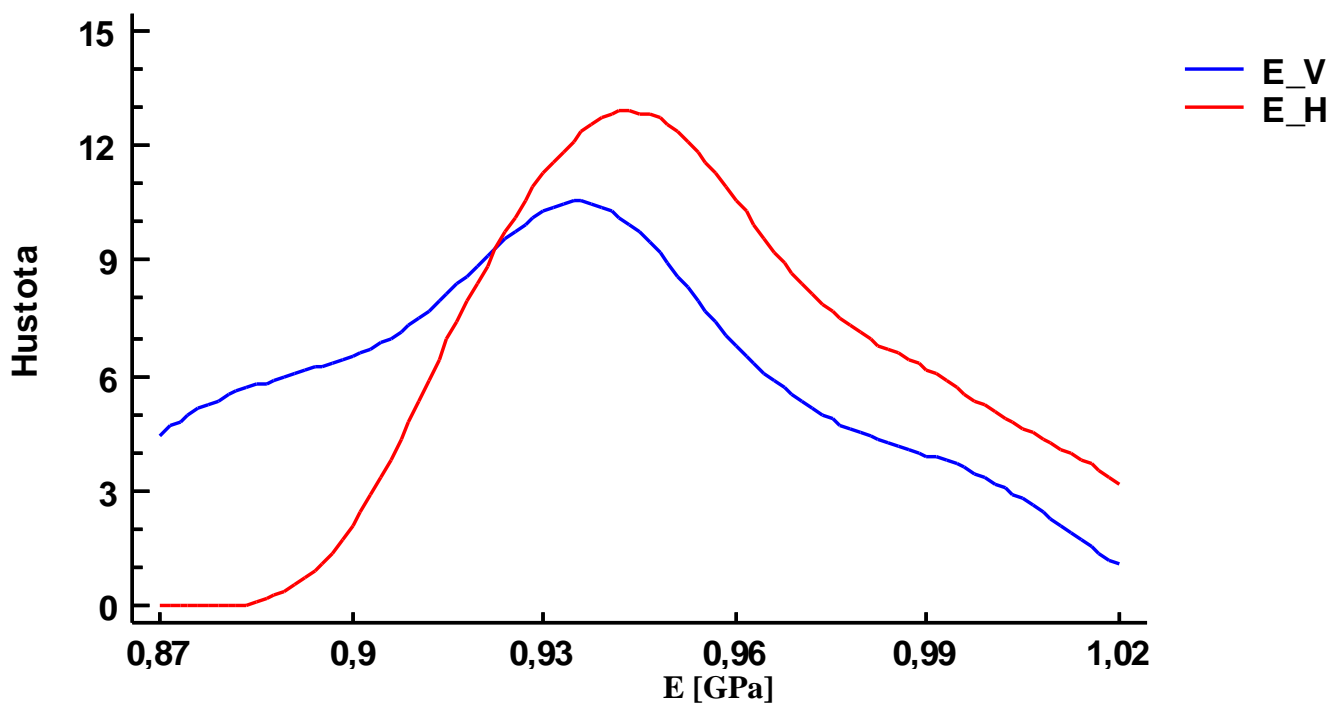
Parametry	Vertikální tisk	Horizontální tisk
Průměr	40,8986 MPa	41,2716 MPa
Medián	40,7317 MPa	41,2058 MPa
Minimální hodnota	40,3502 MPa	40,3575 MPa
Maximální hodnota	41,7705 MPa	42,0735 MPa



## PŘÍLOHA 13

Porovnání modulu pružnosti pro materiál nylon tisknutý horizontálně vs. vertikálně.

Parametry	Vertikální tisk	Horizontální tisk
Průměr	0,9483 GPa	0,9572 GPa
Medián	0,9432 GPa	0,9501 GPa
Minimální hodnota	0,9175 GPa	0,9241 GPa
Maximální hodnota	0,9960 GPa	1,0101 GPa



## PŘÍLOHA 14

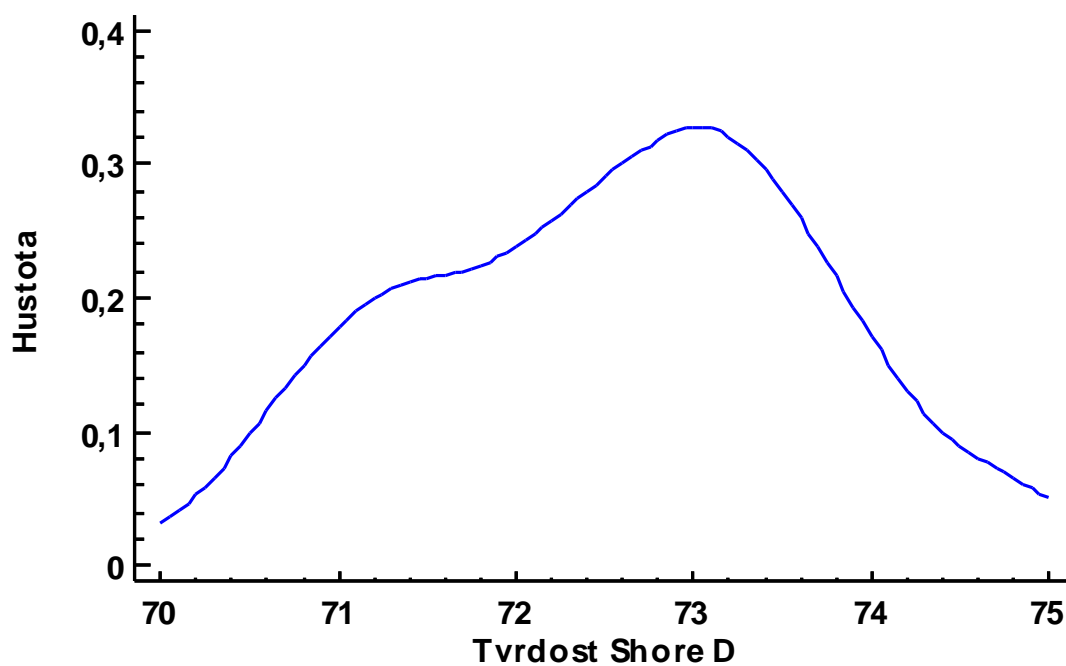
Porovnání tažností pro materiál nylon tisknutý horizontálně vs. vertikálně.

Parametry	Vertikální tisk	Horizontální tisk
Průměr	18,4766 %	45,6630 %
Medián	18,1944 %	59,0151 %
Minimální hodnota	12,7842 %	12,1951 %
Maximální hodnota	23,8525 %	72,8363 %

## PŘÍLOHA 15

Vyhodnocení tvrdosti u materiálu nylon.

Parametry	Hodnoty
Průměr	72,5867
Medián	73,0000
Rozptyl	1,2669
Směrodatná odchylka	1,1256
Variační koeficient	1,5507 %
Střední chyba průměru	0,2906
Minimální hodnota	70,6000
Maximální hodnota	74,7000



## PŘÍLOHA 16

Parametry textury povrchu materiálu nylon.

Parametry	Název	Hodnota [ $\mu\text{m}$ ]	
		Horní strana	Boční strana
$S_a$	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	23,5	12,7
$S_q$	Průměrná kvadratická úchylka povrchu	29,1	15,2
$S_t$	Celková výška povrchu	138	66,3
$S_z$	Výška z deseti bodů povrchu	137	66,0

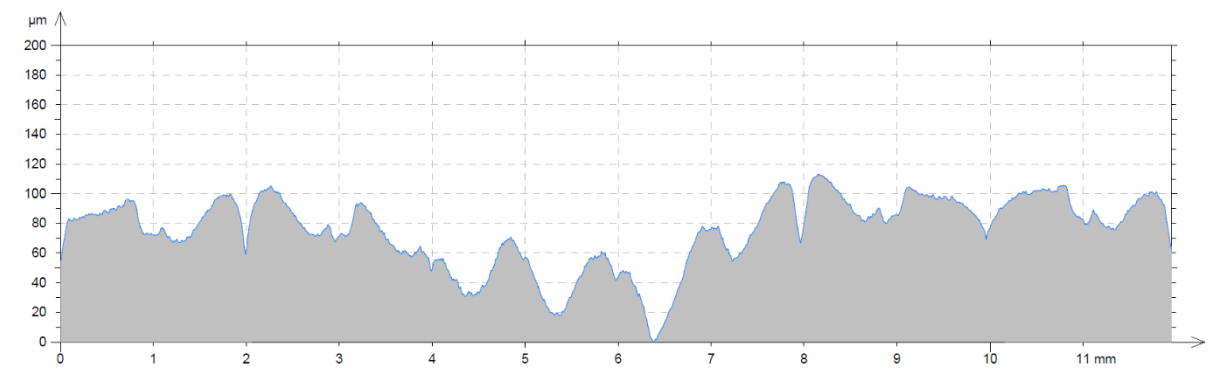


Horní strana.

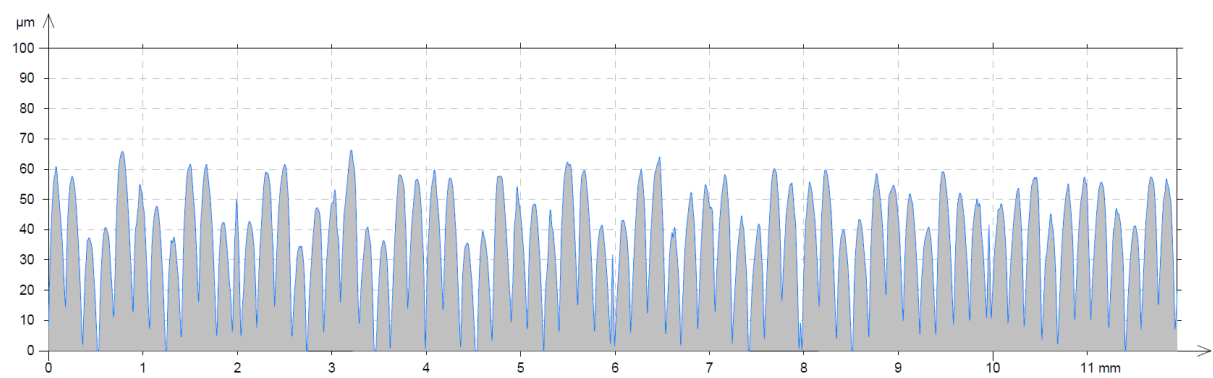


Boční strana.

Parametry		Název	Hodnota [ $\mu\text{m}$ ]	
			Horní strana	Boční strana
Drsnost	$R_a$	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	6,1	12,4
	$R_q$	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	7,3	14,8
	$R_t$	Celková výška profilu drsnosti	41,1	61,7
	$R_z$	Největší výška profilu drsnosti	25,5	54,4
Vlnitost	$W_a$	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	19,5	3,03
	$W_q$	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	21,8	3,5
	$W_t$	Celková výška profilu vlnitosti	85,9	14,8
	$W_z$	Největší výška profilu vlnitosti	33,1	10,1



Horní strana.

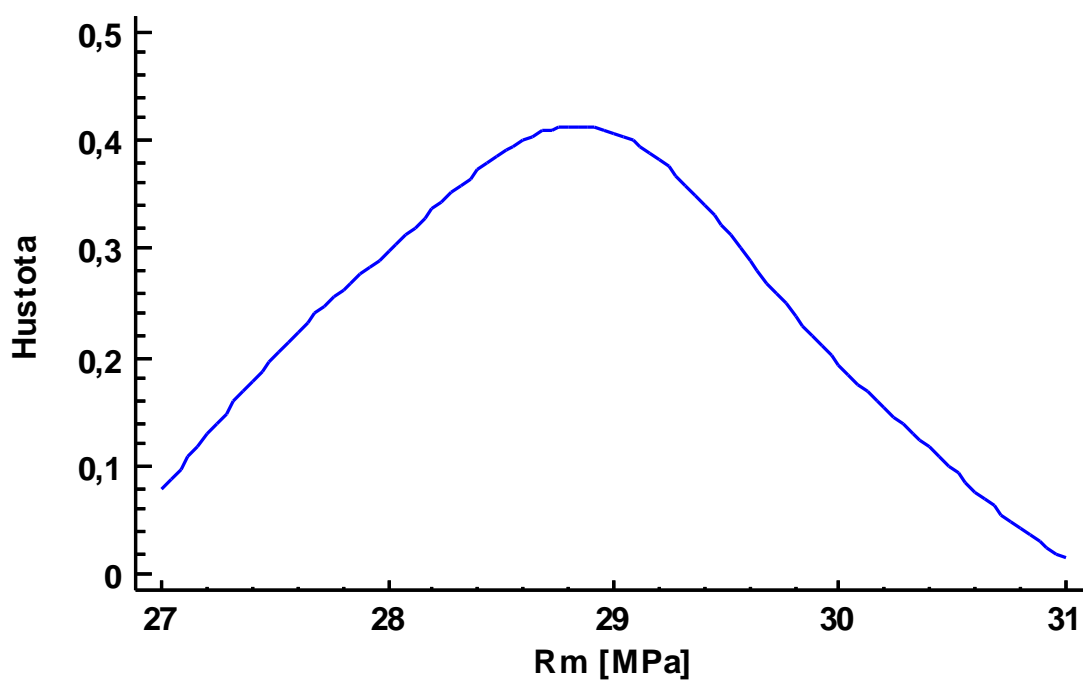


Boční strana.

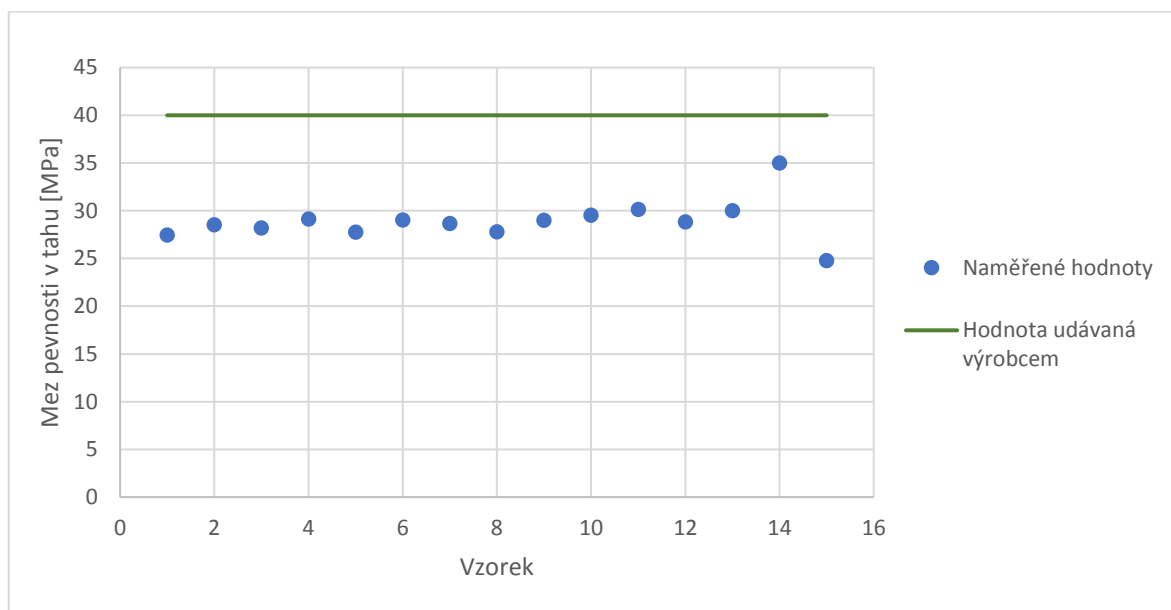
## PŘÍLOHA 17

Statistické zhodnocení meze pevnosti u materiálu SG 2000.

Parametry	Hodnoty
Průměr	28,7806 MPa
Medián	28,8514 MPa
Rozptyl	0,6919
Směrodatná odchylka	0,8318
Variační koeficient	2,8902 %
Střední chyba průměru	0,2307
Minimální hodnota	27,4587 MPa
Maximální hodnota	30,1352 MPa



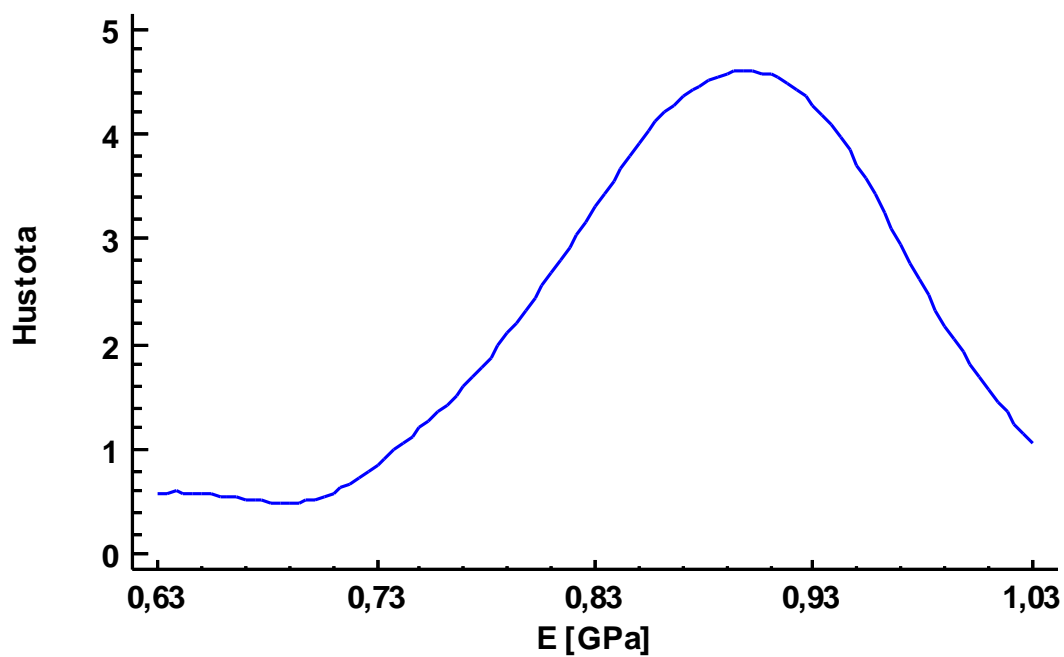




## PŘÍLOHA 18

Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu SG 2000.

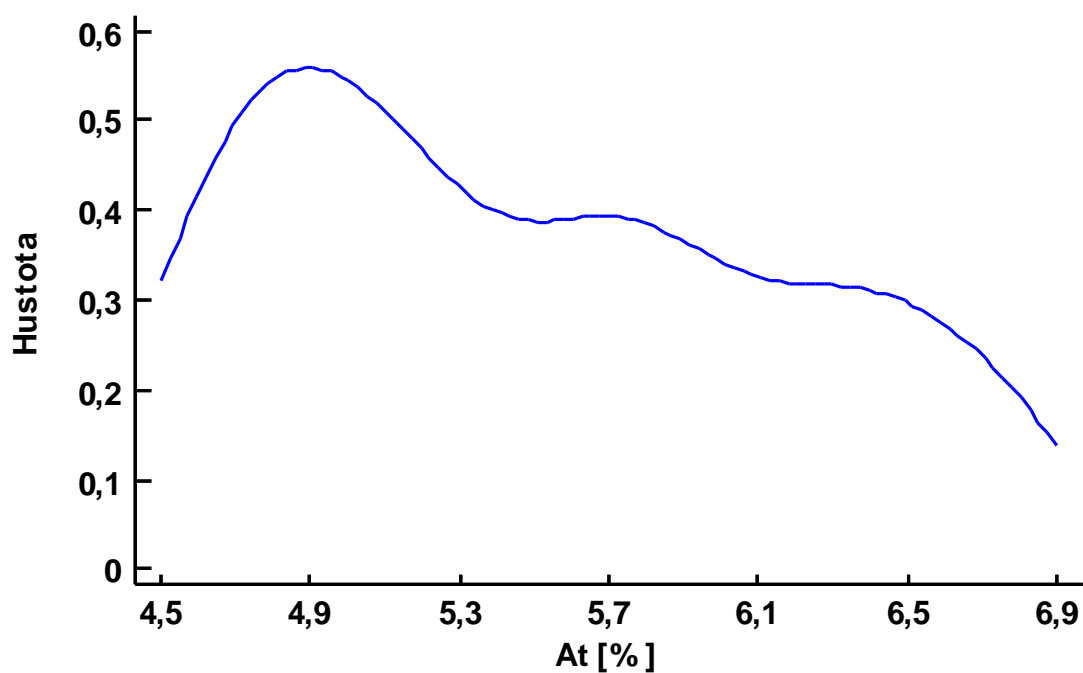
Parametry	Hodnoty
Průměr	0,8723 GPa
Medián	0,8853 GPa
Rozptyl	0,0087
Směrodatná odchylka	0,0933
Variační koeficient	10,6996 %
Střední chyba průměru	0,0249
Minimální hodnota	0,6387 GPa
Maximální hodnota	1,0008 GPa



## PŘÍLOHA 19

Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu SG 2000.

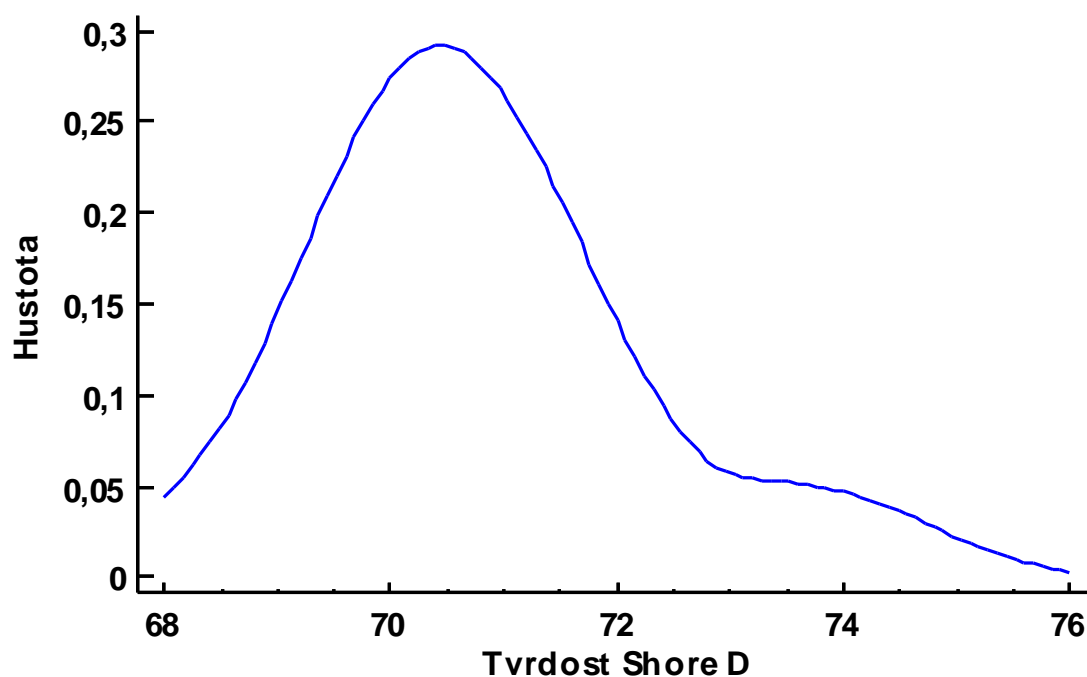
Parametry	Hodnoty
Průměr	5,4860 %
Medián	5,5264 %
Rozptyl	0,4914
Směrodatná odchylka	0,7010
Variační koeficient	12,7785 %
Střední chyba průměru	0,1810
Minimální hodnota	4,5224 %
Maximální hodnota	6,6083 %

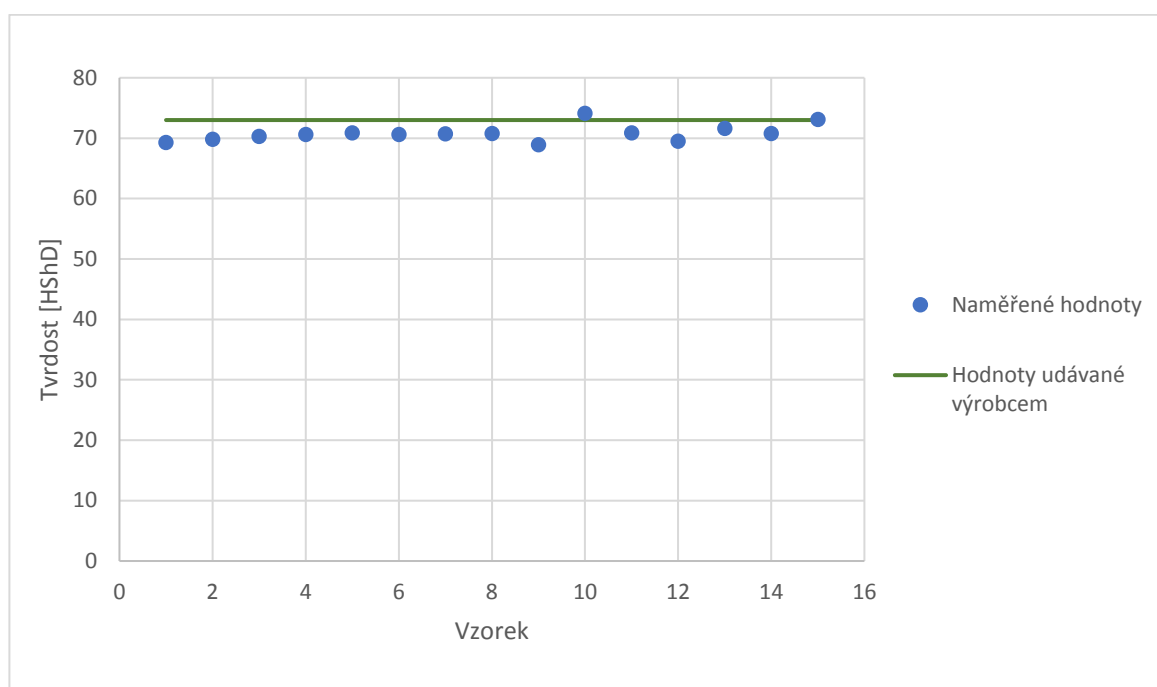


## PŘÍLOHA 20

Vyhodnocení tvrdosti u materiálu SG 2000.

Parametry	Hodnoty
Průměr	70,7933
Medián	70,7000
Rozptyl	1,8378
Směrodatná odchylka	1,3557
Variační koeficient	1,9149 %
Střední chyba průměru	0,3500
Minimální hodnota	68,9000
Maximální hodnota	74,1000

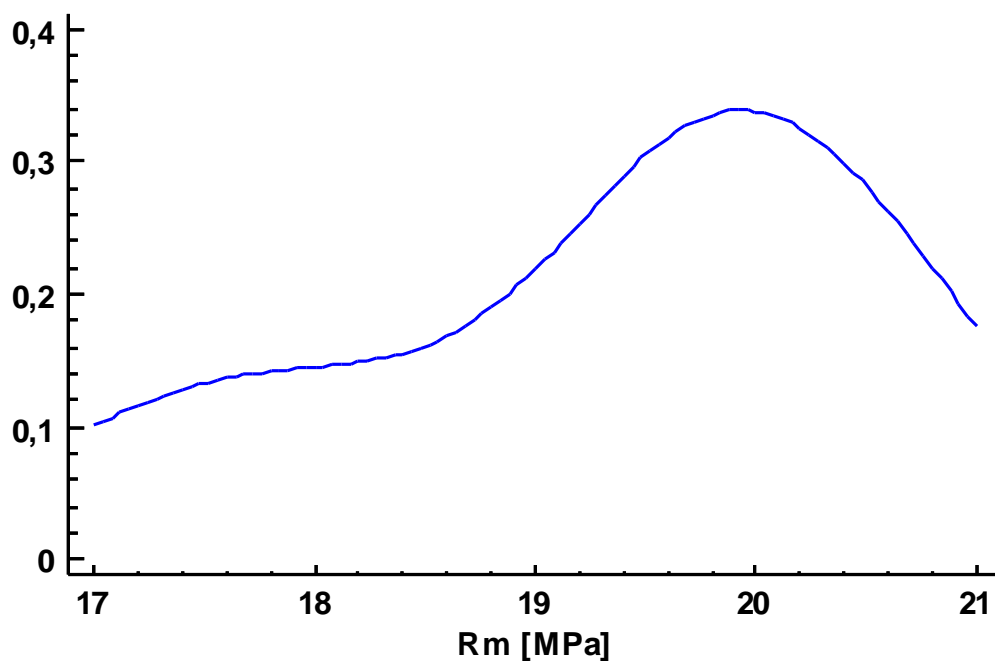




## PŘÍLOHA 21

Statistické zhodnocení meze pevnosti u materiálu SG 2000 + Al pojivo.

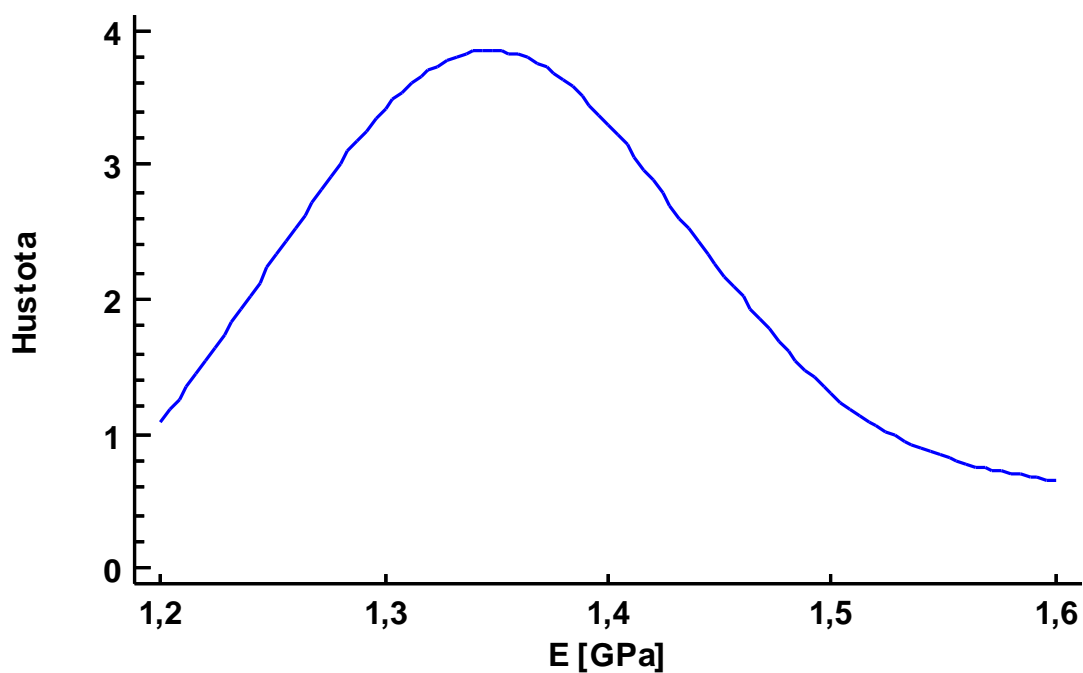
Parametry	Hodnoty
Průměr	19,3678 MPa
Medián	19,6408 MPa
Rozptyl	1,3449
Směrodatná odchylka	1,1597
Variační koeficient	5,9879 %
Střední chyba průměru	0,3217
Minimální hodnota	17,4811 MPa
Maximální hodnota	20,9101 MPa



## PŘÍLOHA 22

Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu SG 2000 + Al pojivo.

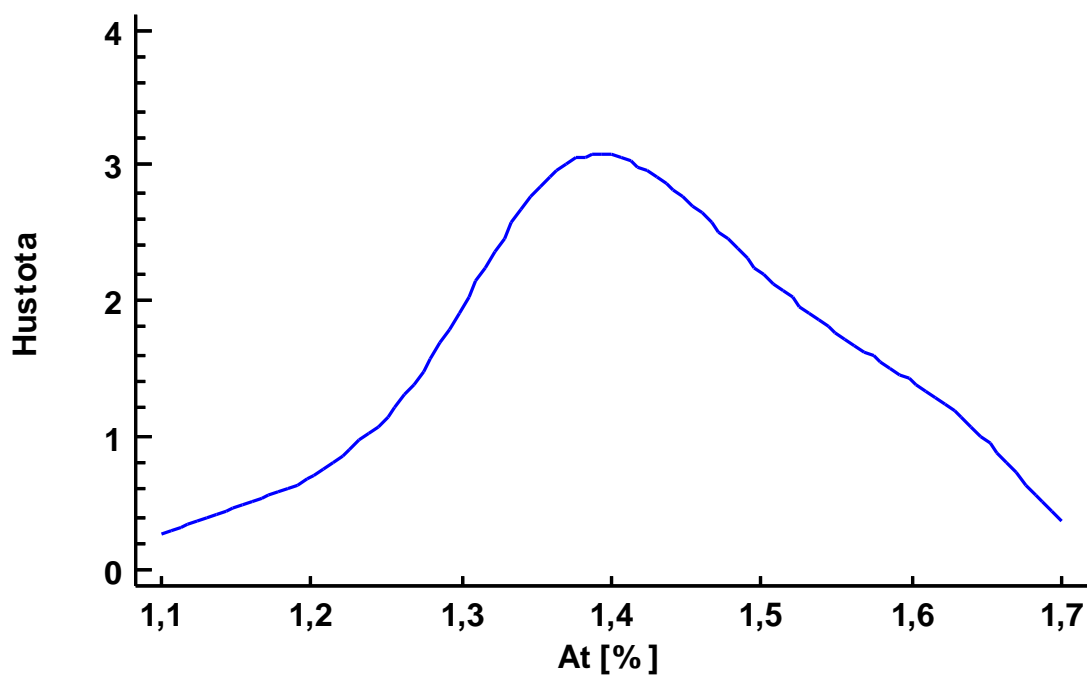
Parametry	Hodnoty
Průměr	1,3758 GPa
Medián	1,3564 GPa
Rozptyl	0,0102
Směrodatná odchylka	0,1009
Variační koeficient	7,3349 %
Střední chyba průměru	0,0336
Minimální hodnota	1,2687 GPa
Maximální hodnota	1,5947 GPa



## PŘÍLOHA 23

Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu SG 2000 + Al pojivo.

Parametry	Hodnoty
Průměr	1,4192 %
Medián	1,4203 %
Rozptyl	0,0149
Směrodatná odchylka	0,1222
Variační koeficient	8,6066 %
Střední chyba průměru	0,031539
Minimální hodnota	1,1657 %
Maximální hodnota	1,6085 %

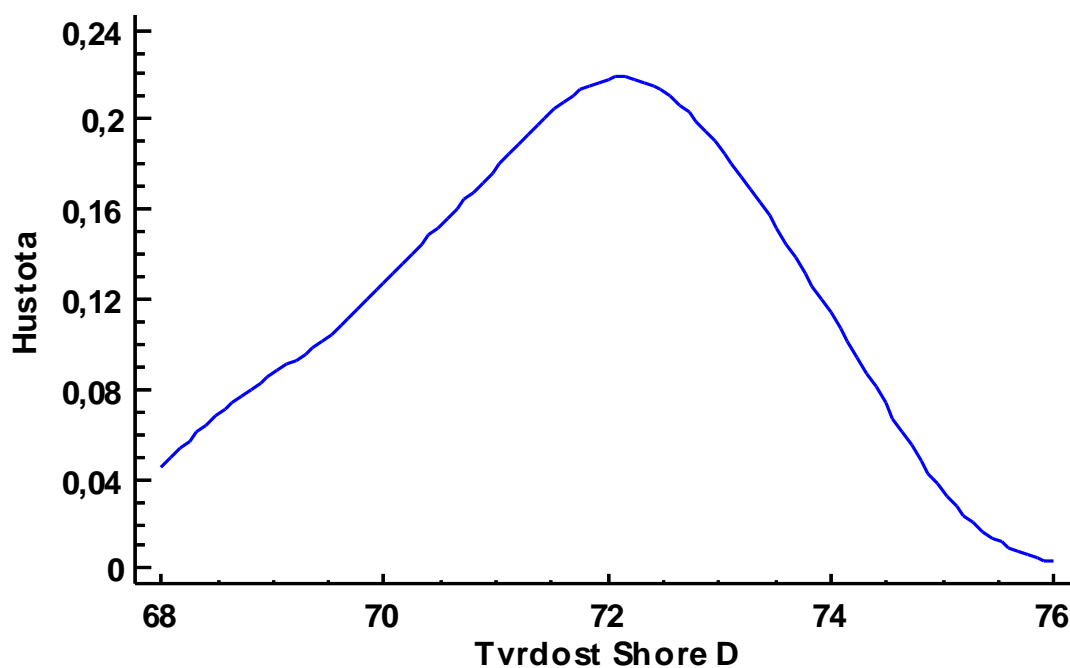




## PŘÍLOHA 24

Vyhodnocení tvrdosti u materiálu SG 2000 + AL pojivo.

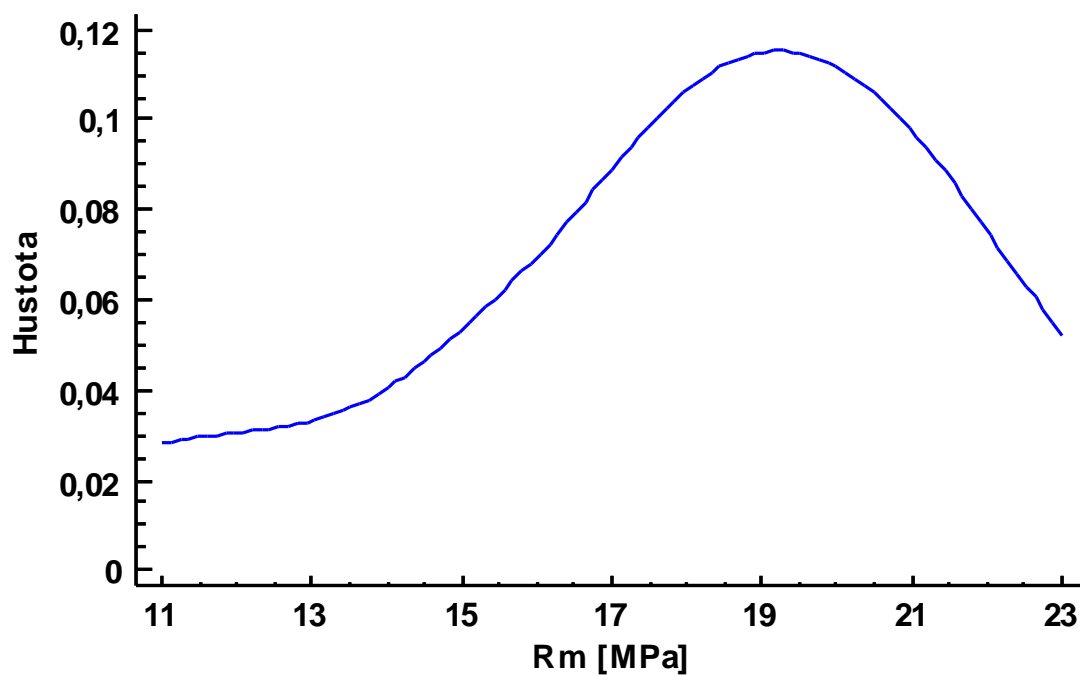
Parametry	Hodnoty
Průměr	71,6333
Medián	71,6000
Rozptyl	2,5967
Směrodatná odchylka	1,61142
Variační koeficient	2,2495 %
Střední chyba průměru	0,4161
Minimální hodnota	68,9000
Maximální hodnota	74,1000



## PŘÍLOHA 25

Statistické zhodnocení meze pevnosti u materiálu SG 145.

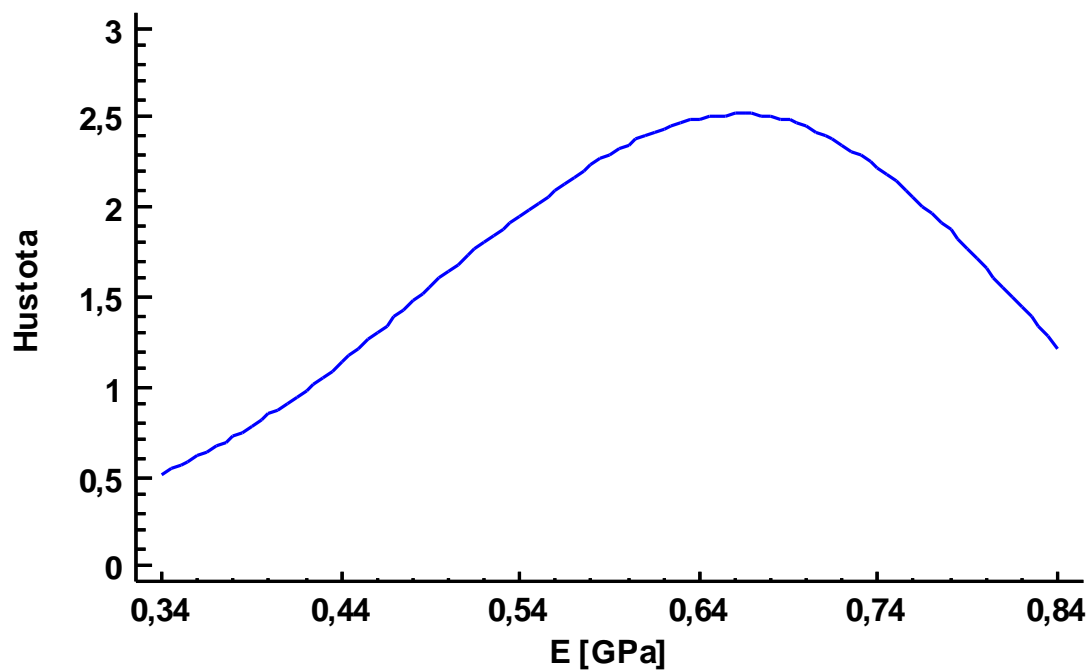
Parametry	Hodnoty
Průměr	17,9572 MPa
Medián	18,2554 MPa
Rozptyl	11,6674
Směrodatná odchylka	3,4158
Variační koeficient	19,0216 %
Střední chyba průměru	0,9129
Minimální hodnota	11,2233 MPa
Maximální hodnota	21,5666 MPa



## PŘÍLOHA 26

Statistické zhodnocení modulu pružnosti v tahu u materiálu SG 145.

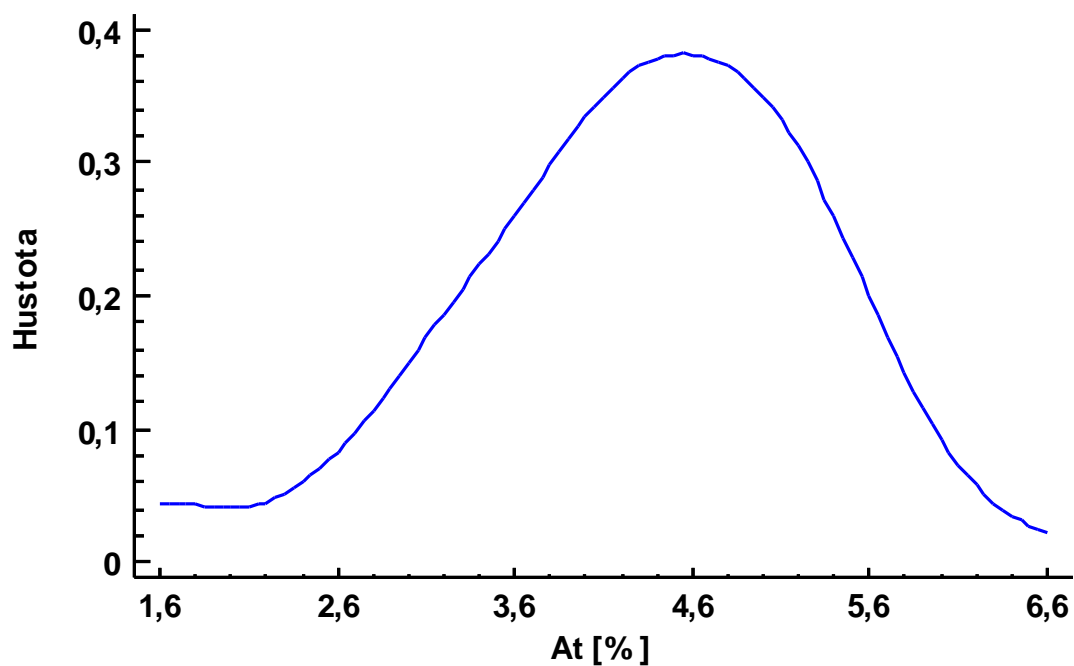
Parametry	Hodnoty
Průměr	0,6299 GPa
Medián	0,6395 GPa
Rozptyl	0,0181
Směrodatná odchylka	0,1346
Variační koeficient	21,3715 %
Střední chyba průměru	0,0348
Minimální hodnota	0,3483 GPa
Maximální hodnota	0,8295 GPa



## PŘÍLOHA 27

Statistické zhodnocení tažnosti u materiálu SG 145.

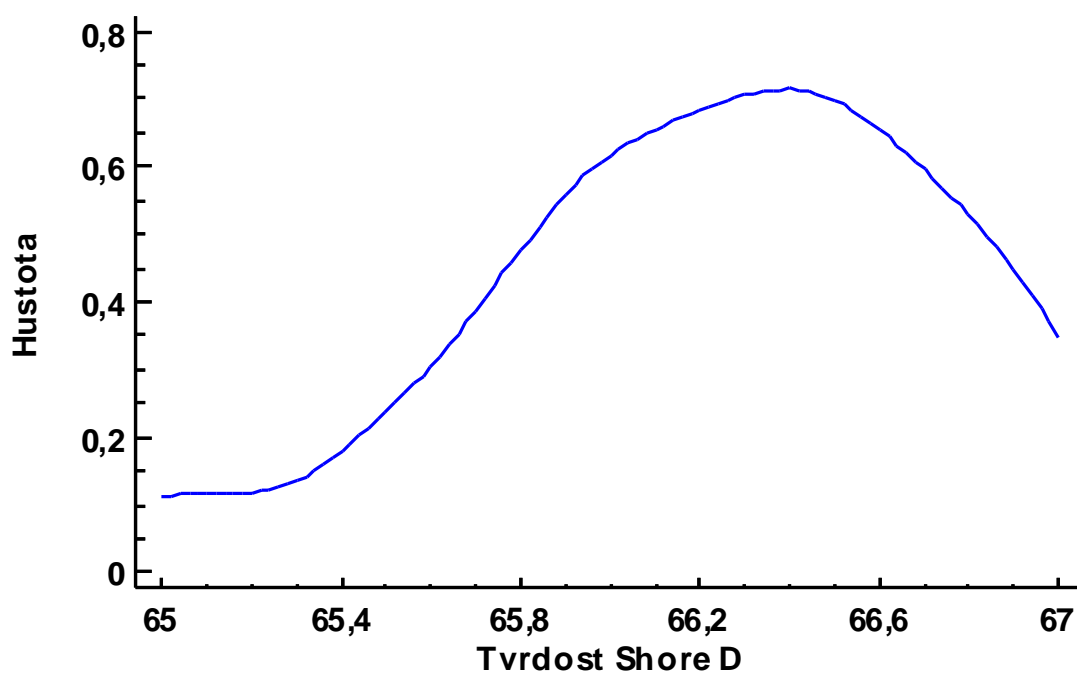
Parametry	Hodnoty
Průměr	4,2399 %
Medián	4,5972 %
Rozptyl	1,0539
Směrodatná odchylka	1,0266
Variační koeficient	24,2132 %
Střední chyba průměru	0,2651
Minimální hodnota	1,6332 %
Maximální hodnota	5,8064 %

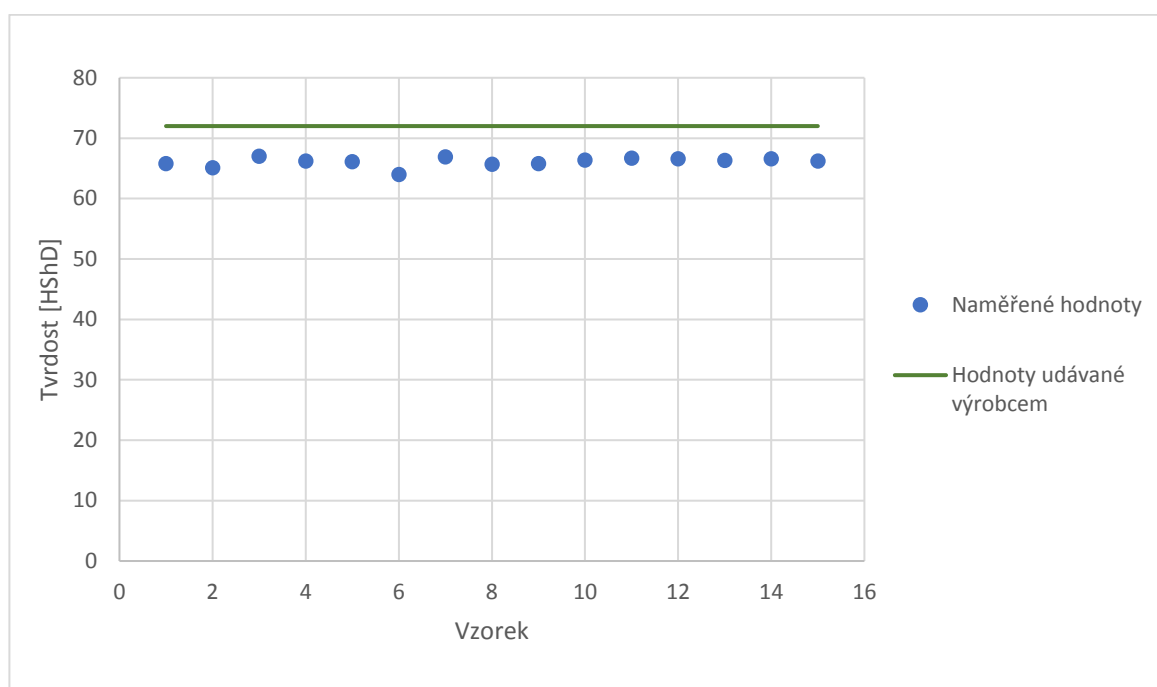


## PŘÍLOHA 28

Vyhodnocení tvrdosti u materiálu SG 145.

Parametry	Hodnoty
Průměr	66,2429
Medián	66,2500
Rozptyl	0,2703
Směrodatná odchylka	0,5199
Variační koeficient	0,7849 %
Střední chyba průměru	0,1389
Minimální hodnota	65,1000
Maximální hodnota	67,0000





## PŘÍLOHA 29

Materiálový list pro materiál ABS.

# ABS-M30

Production-Grade Thermoplastic for Fortus 3D Production Systems

ABS-M30™ is up to 25 to 70 percent stronger than standard ABS and is an ideal material for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools and end-use-parts. ABS-M30 has greater tensile, impact and flexural strength than standard ABS. Layer bonding is significantly stronger than that of standard ABS, for a more durable part. This results in more realistic functional tests and higher quality parts for end use. ABS-M30 parts are stronger, smoother and have better feature detail.



Mechanical Properties <sup>1</sup>	Test Method	English		Metric	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,550 psi	3,750 psi	31 MPa	26 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,650 psi	4,050 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	310,000 psi	2,230 MPa	2,180 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7%	2%	7%	2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	1%	2%	1%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	7,000 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	250,000 psi	2,060 MPa	1,760 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	3.5%	4%	3.5%

Mechanical Properties	Test Method	English	Metric
		XZ Axis	XZ Axis
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.4 ft-lb/in	128 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.6 ft-lb/in	300 J/m

Thermal Properties <sup>1</sup>	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/S0)	ASTM D1525	210°F	99°C
Glass Transition (Tg)	DSC (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.90 <sup>-6</sup> in/in/°F	8.82 <sup>-6</sup> mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.70 <sup>-6</sup> in/in/°F	8.46 <sup>-6</sup> mm/mm/°C
Melting Point	-----	Not Applicable <sup>2</sup>	Not Applicable <sup>2</sup>



**Stratasys** | Production Series

## PŘÍLOHA 30

Materiálový list pro materiál nylon.



# FDM Nylon 12

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR  
FORTUS 3D PRINTERS

FDM Nylon 12™ is the first material in Stratasys' family of nylon offerings, complementing the current portfolio of FDM® materials and enabling new applications requiring: repetitive snap fits, high fatigue resistance, strong chemical resistance and press (friction) fit inserts. FDM Nylon 12 is primarily used in aerospace, automotive and consumer goods industries to take on everything from tooling, jigs and fixtures to covers, panels and vibration resistant components. For use with Fortus 380mc™, 450mc™ and 900mc™ 3D Printers, FDM Nylon 12 offers unparalleled toughness and a simple, clean process – free of powders.

CONDITIONED*					
MECHANICAL PROPERTIES†	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ AXIS	ZX AXIS	XZ AXIS	ZX AXIS
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,600 psi	4,100 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6,600 psi	5,600 psi	46 MPa	38.5 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	166,000 psi	165,000 psi	1,262 MPa	1,138 MPa
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	30%	5.4%	30%	5.4%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2.4%	2.7%	2.4%	2.7%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	9,700 psi	8,600 psi	67 MPa	61 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	166,000 psi	171,000 psi	1,276 MPa	1,180 MPa
Flexural Strain at Break	ASTM D790	No Break	>10%	No Break	>10%
IZOD Impact - notched (Method A, 23 °C)	ASTM D256	2.5 ft-lb/in	1 ft-lb/in	135 J/m	53 J/m
IZOD Impact - unnotched (Method A, 23 °C)	ASTM D256	31 ft-lb/in	3.7 ft-lb/in	1,656 J/m	200 J/m
Compressive Strength, Yield (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	7,400 psi	7,900 psi	51 MPa	55 MPa
Compressive Strength, Ultimate (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	24,200 psi	800 psi	167 MPa	6 MPa
Compressive Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	730,000 psi	155,000 psi	5,033 MPa	1,069 MPa
UNCONDITIONED (DRY)**					
MECHANICAL PROPERTIES	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ AXIS	ZX AXIS	XZ AXIS	ZX AXIS
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7,700 psi	6,900 psi	53 MPa	48 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	190,000 psi	180,000 psi	1,310 MPa	1,241 MPa
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	9.5%	5%	9.5%	5%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6.5%	5%	6.5%	5%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	10,000 psi	8,600 psi	69 MPa	60 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	190,000 psi	180,000 psi	1,300 MPa	1,250 MPa
Flexural Strain at Break	ASTM D790	No Break	>10%	No Break	>10%
IZOD Impact - notched (Method A, 23 °C)	ASTM D256	2.8 ft-lb/in	0.9 ft-lb/in	150 J/m	50 J/m
IZOD Impact - unnotched (Method A, 23 °C)	ASTM D256	>37.4 ft-lb/in	5.1 ft-lb/in	>2,000 J/m	275 J/m

STRATASYS.COM

**stratasys**

A GLOBAL LEADER IN APPLIED ADDITIVE TECHNOLOGY SOLUTIONS



## PŘÍLOHA 31

Materiálový list pro materiál SG 2000.

**ebalta SG 2000/2000L**  
Technický návod

Vlastnosti a údaje: /bez plniva !!!/

Barva pryskyřice komp.A	: bílá
tužidlo komp.B	: světle žlutá
Viskozita směsi mPas	: 40 - 60
Hustota směsi kg/dm <sup>3</sup>	: 1,10
Tvrdost Shore D při 20°C	: 70 - 75
Pevnost v tlaku N/mm <sup>2</sup>	: 55 - 60
Pevnost v tahu N/mm <sup>2</sup>	: 40 - 45
Pevnost v ohybu N/mm <sup>2</sup>	: 70 - 75
E - modul /ohyb/ N/mm <sup>2</sup>	: 1300 - 1500
Rázová houžev. KJ/mm <sup>2</sup>	: 24 - 27
Tepelná odolnost bez plniva	: 60-70 °C
Tepelná odolnost s plnivem	: 90-100°C

Podmínky pro použití:

Poměr: 100 hm.dílů pryskyřice komp.A  
100 hm.dílů tužidla komp.B

Doba zprac. 200 g při 20°C:

SG 2000S	SG 2000	SG 2000 L
3-4 min.	3 min.	7-8 min.

Vytvrzení/vyjmutí z formy/:

SG 2000S	SG 2000	SG 2000 L
15-30 min.	30-60 min.	60-90 min.

Skladovací schopnost  
v uzavřeném stavu min. : 1/2 roku  
Pryskyřici před každým použitím dobře zamíchat.  
Po každém použití hned uzavřít obal.

Balení:

pryskyřice:	1 kg; 5 kg; 25 kg; 50 kg
tužidlo	: 1 kg; 5 kg; 25 kg; 50 kg

plnivo F-A, F-B, F-Alu

## PŘÍLOHA 32

Materiálový list pro materiál SG 145.

### ebalta SG 145

Technický návod

#### Vlastnosti a údaje:

Barva pryskyřice A	: béžová
tužidla B	: hnědá
Viskozita směsi bez pl.mPas	: 70 - 90
Hustota směsi bez pl.kg/dm <sup>3</sup>	: 1,08±0,02
Tvrdost Shore D při 20°C	: 72 - 75
Pevnost v tlaku	: 40 - 50 N/mm <sup>2</sup>
Pevnost v ohybu	: 50 - 55 N/mm <sup>2</sup>
E-modu( v ohybu )	: 1400 - 1500 N/mm <sup>2</sup>
Tepelná odolnost	: ca. 55±2°C
Rázová houževnatost:	15 - 20 KJ/m <sup>2</sup>
Průhyb %	: 6 - 6,5
Lin. smrštění při 1,5 nás. F-B	0,13 %

#### Podmínky pro použití:

Poměr :	100 hm.dílů prysk. SG 145 A
	100 hm.dílů tužid. SG 145 B
Doba zprac. 200 g při 20°C:	5-7 min.
Vytvrzení/vyjmutí z formy/:	1-2 hod.
Zpracovací a vytvrz.tepl.	: 18 - 25°C
Skladovací schopnost	
v uzavř.stavu min.	: 1/2 rok
Pryskyřici před každým použitím dobře	
zamíchat.	
Po každém použití hned uzavřít.	

#### Balení:

pryskyřice:	1 kg; 5 kg; 25 kg
tužidlo	: 1 kg; 5 kg; 25 kg
plniva	: kg F-A, F-B, F-Alu